

Anwendung des komplexen elektrischen
Widerstandsverfahrens an Eichen (*Quercus spp.*)

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt von
Diplom-Geophysikerin
Tina Martin
aus Potsdam

genehmigt von der Fakultät für Energie- und
Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung
16.09.2009

Vorsitzender der Prüfungskommission

Prof. Dr.-Ing. N. Meyer

Hauptberichterstatter

Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Weller

Berichterstatter

Prof. Dr. A. Kemna, Universität Bonn

Diese Arbeit wurde angefertigt an der BAM Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung
Fachgruppe VIII.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und
Umweltmessverfahren

Berlin 2009

D 104

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fragestellung und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Holz - Stand des Wissens	3
2.1	Makroskopischer Aufbau von Holz	3
2.1.1	Holzschichten	3
2.1.2	Jahrringe	4
2.2	Mikroskopischer Aufbau von Laubholz	5
2.2.1	Holzzellen	5
2.2.2	Aufbau der Zellwand	6
2.3	Chemische Zusammensetzung von Holz	6
2.4	Physikalische Eigenschaften von Holz	7
2.4.1	Holzfeuchte	7
2.4.2	Dichte	8
2.4.3	Elektrische Eigenschaften	9
2.5	Biologischer Abbau von Holz	10
2.5.1	Braunfäule	10
2.5.2	Weißfäule	11
2.5.3	Moderfäule	12
2.6	Spezifische Holzeigenschaften von Eiche	12
2.7	Untersuchung von Bäumen	13
2.7.1	Bohrkernentnahme	13
2.7.2	Bohrwiderstand	13
2.7.3	Schallverfahren	14
2.7.4	Elektrische Verfahren	16
2.7.5	Weitere Verfahren	18
3	Die komplexe elektrische Leitfähigkeit	21
3.1	Elektrische Leitfähigkeit	21
3.1.1	Grundlagen	21
3.1.2	Leitfähigkeitsmechanismen	22
3.2	Spektrale Induzierte Polarisierung (SIP)	24
3.2.1	Definition	24
3.2.2	Anwendung	25
3.2.3	Messungen	26
3.2.4	Auswertesoftware	29
4	Voruntersuchungen am zylindrischen Probekörper	33

4.1	Zylindrischer Probekörper	33
4.2	Elektroden	34
4.2.1	Elektrodenart	34
4.2.2	Elektrodenmaterial	35
4.3	Messkonfiguration	36
4.3.1	Dipol-Dipol	36
4.3.2	Bipol-Dipol	39
4.3.3	Vergleich mit anderen Konfigurationen	42
4.4	3D-Effekt	43
4.4.1	Konfigurationsfaktor	44
4.4.2	Wasserstandshöhe	46
4.5	Auflösungsvermögen	48
4.5.1	Holzbalken	48
4.5.2	Plastikrohr	49
4.5.3	Metallrohr	50
4.6	Erkenntnisse aus den Messungen am zylindrischen Probekörper	51
5	Labormessungen	53
5.1	Anisotropie	53
5.2	Entsättigung	60
5.3	Laborlangzeitversuche mit Pilzbefall	66
5.3.1	Eichenwirrling (<i>Daedalea quercina</i>)	66
5.3.2	Schwefelporling (<i>Laetiporus sulphureus</i>)	78
5.3.3	Vergleich	83
5.4	Labormessungen an pilzbefallenen Eichen	84
5.4.1	Eiche mit Eichenwirrling (<i>Daedalea quercina</i>)	85
5.4.2	Eiche mit Schwefelporling (<i>Laetiporus sulphureus</i>)	87
5.5	Erkenntnisse aus den Labormessungen	88
6	Feldmessungen	93
6.1	Gesunde Referenzeiche	93
6.1.1	Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung	94
6.1.2	Frequenzabhängigkeit	96
6.1.3	Jahreszeitenabhängigkeit	96
6.2	Vergleich von Eichen verschiedenen Alters	99
6.2.1	Junge Eiche	99
6.2.2	Alte Eichen - Vergleich	100
6.3	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall, Vergleich Feld- mit Labordaten	104
6.4	Eiche Nr. 2 - Pilzbefall, Vergleich mit Schalltomographie	108
6.5	Eiche Nr. 3 - Pilzbefall, Vergleich mit Bohrwiderstand	112
6.6	Erkenntnisse aus den Feldmessungen	116
7	Zusammenfassung und Diskussion	119
	Anhang	125

A	Vorbereitende Untersuchungen	125
B	Labormessungen	129
C	Feldmessungen	143
	Abbildungsverzeichnis	153
	Tabellenverzeichnis	165
	Literaturverzeichnis	167
	Danksagung	175

1 Einleitung

1.1 Fragestellung und Zielsetzung

Die Nachfrage nach zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Baumdiagnostik steigt stetig. Wo vor wenigen Jahren noch fälschlicherweise Fällungen angeordnet wurden, können heute dank des wissenschaftlichen Fortschritts Fehleinschätzungen bei der Baumbeurteilung deutlich verringert werden. Moderne Messgeräte und angepasste Messverfahren machen dies möglich. Gerade tomographische Verfahren, die einen Blick ins Innere des Baumes gewähren können, haben sich in den letzten 15 Jahren stark weiterentwickelt. Dabei standen bisher die Computertomographie (*Habermehl und Ridder* (1996)) und die Schalltomographie (*Rust et al.* (2002), *Nicolotti et al.* (2003)) im Vordergrund. Parallel dazu wurden aus einfachen elektrischen Geräten zur Erfassung des Holzfeuchtegehalts (*Stamm* (1930)) die elektrische Tomographie entwickelt. Seit ca. 10 Jahren wird sie vor allem an der Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen praktiziert. Dabei lag der Schwerpunkt bisher auf der Farbkerndiagnose an stehenden Rotbuchen mithilfe der elektrischen Widerstandstomographie (*Weihs et al.* (1999), *Dubbel et al.* (1999), *Hanskötter* (2003)).

Die Geophysik bietet eine Vielzahl verschiedener Verfahren zur zerstörungsfreien Erkundung des Erdbodens. Dass es möglich ist, einige davon auf Bäume zu adaptieren, zeigten bereits *Just* (2002) und *al Hagrey* (2007) in ihren Untersuchungen. Dabei stand die elektrische Widerstandstomographie im Vordergrund, da der spezifische Widerstand stark vom Wassergehalt des Holzes abhängt. Damit sind Änderungen des Saftflusses in Bäumen gut zu beobachten (*al Hagrey* (2006)). Veränderungen durch Fäule oder Rotkernigkeit sind aber nicht eindeutig detektierbar. Eine Verbesserung könnte nach Ansicht von *Hanskötter* (2003) in der zusätzlichen Erfassung der Phasenverschiebung und der Messung des frequenzabhängigen komplexen Widerstands liegen. Das in dieser Arbeit dafür genutzte Verfahren der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) wurde ursprünglich in der Erzexploration (*Pelton et al.* (1978)) und der Detektion mineralischer Lagerstätten (*Olhoeft* (1985)) eingesetzt. Darüberhinaus wird es zu archäologischen Erkundungen (*Schleifer et al.* (2002)) und zur Detektion von Schädigungen an Mauerwerk durch Salzbelastung (*Kruschwitz* (2007)) genutzt.

Der Ansatz zur zerstörungsfreien Prüfung an Bäumen durch das SIP-Verfahren erscheint erfolgversprechend, da neben der Erfassung des spezifischen Widerstands und damit indirekt der Holzfeuchte auch die Erfassung mikrostruktureller Eigenschaften durch die Phasenmessung realisiert werden kann. An Gesteinen ist die Phase sensitiv gegenüber Änderungen der inneren Oberfläche und der Porenraumgeometrie. An Bäumen könnte sie demnach Einblick geben über Art und Zustand der Holzzellen und damit über den Zustand im Inneren des Baumes.

Ziel dieser Arbeit ist es, das SIP-Verfahren an Bäumen anzuwenden, die Möglich-

keiten des Verfahrens darzulegen und es hinsichtlich der Eignung zur zerstörungsfreien Baumdiagnose zu überprüfen. Dabei lag der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf der Quantität der verschiedenen Baumarten, sondern auf der von gewinnbaren Aussagen. So wurde sich auf die Baumart Eiche (*Quercus spp.*) konzentriert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um die charakteristischen Merkmale von Bäumen zu verstehen, steht zu Beginn dieser Arbeit ein Kapitel über den Aufbau und die Eigenschaften von Holz. Auf die spezifischen Holzeigenschaften von Eiche wird dabei näher eingegangen. Ein Überblick über aktuelle Untersuchungsmethoden an Holz wird gegeben.

Die theoretischen Grundlagen werden im dritten Kapitel näher erläutert. Dabei geht es sowohl um die Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit als auch über das Verfahren der Spektralen Induzierten Polarisation.

Das darauf folgende Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Untersuchungen zu tomographischen Messungen an einem zylindrischen Probekörper. Ziel dieses Kapitels ist die Abschätzung des Einflusses von Randbedingungen auf die tomographischen Feldmessungen. Dabei geht es neben der Frage nach den Elektroden auch um die am besten geeignete Messkonfiguration. Dazu wird eine neue Elektrodenauslage vorgestellt. Das Auflösungsvermögen zeigt anschließend, in welchem Rahmen eine Detektion von Fehlstellen überhaupt möglich ist.

Um das Verhalten des komplexen elektrischen Widerstands von Eichenkernholzproben im Labor geht es in Kapitel 5. Dazu werden wichtige Untersuchungen zur Anisotropie und zum Sättigungsverhalten durchgeführt. Der Nachweis der Holzveränderung durch Pilzbefall auf die elektrischen Eigenschaften ist ein wesentlicher Punkt dieses Kapitels. Dazu werden zwei Laborlangzeitversuche mit den braunfäuleerregenden Pilzen *Daedalea quercina* (Eichenwirrling) und *Laetiporus sulphureus* (Schwefelporling) gezeigt. Dass die Laborergebnisse auch auf stehende Bäume übertragen werden können, ist an zwei anschließenden Beispielen zu sehen.

Mit dem Wissen aus den vorhergehenden Abschnitten geht es im Kapitel 6 um die praktische Anwendung der tomographischen SIP-Messungen an stehenden Bäumen. Zu Beginn werden Tomogramme gesunder Eichen gezeigt. Sie dienen als Vergleichsgrundlage für die darauffolgenden pilzbefallenen Eichen. An weiteren Beispielen werden die Abhängigkeit der Messungen von der Messfrequenz, der Jahreszeit und dem Baumalter aufgezeigt. An drei Eichen mit Pilzbefall wird das tomographische SIP-Verfahren mit den Labormesswerten, der Schalltomographie und dem Bohrwiderstandsverfahren verglichen.

Die Diskussion der erzielten Ergebnisse und die Zusammenfassung bilden dann das Ende dieser Arbeit.

2 Holz - Stand des Wissens

Holz ist ein natürliches, heterogenes und anisotropes Material. Um die Zusammenhänge und Eigenschaften von Holz zu verstehen, soll auf den kommenden Seiten ein kurzer Abriss über den Aufbau, die chemischen Zusammensetzungen und Eigenschaften sowie über den Abbau von Holz gegeben werden.

Anschließend wird der aktuelle Stand der Untersuchungsmethoden für Holz dokumentiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf die in dieser Arbeit genutzten und in der Praxis häufig verwendeten Methoden zur Bewertung von Vitalitätszuständen am lebenden Baum. Diejenigen der bereits angewendeten Verfahren, die einen geophysikalischen Hintergrund haben, werden ausführlicher erläutert.

Da der Fokus dieser Arbeit auf Eichen liegen, wird der Auf- und Abbau des Holzes vorwiegend an Laubbäumen bzw. speziell an der Beschaffenheit von Eichenholz erläutert. Ansonsten sei auf die weiterführende Literatur (z.B. *Kollmann* (1936), *Trendelenburg und Mayer-Wegelin* (1955), *Niemz* (1993), *Wagenführ* (1999) uvm.) verwiesen.

2.1 Makroskopischer Aufbau von Holz

2.1.1 Holzschichten

Im Querschnitt von Laub- und Nadelbäumen lassen sich verschiedene Schichten von außen nach innen unterscheiden (Abb. 2.1, *Kollmann* (1936)).

Die *Außenrinde* (Borke) bildet die äußerste Baumschicht und besteht aus abgestorbenen Korkzellen. Sie ist wasserundurchlässig und schützt den Baum vor physikalischen Einflüssen wie Austrocknung, Beschädigung, Witterung sowie vor Schädlingen und Infektionen.

Die anliegende *Innenrinde* (Bast, Phloem) ist die innere, lebende Rindenschicht und hat die Aufgabe des Transportes der in Wasser gelösten Nährstoffen von der Krone in die Wurzeln sowie deren Speicherung.

Das darauf folgende *Kambium* (Bildungsgewebe) bildet die neuen Zellen. Es ist angesiedelt zwischen Rinde und Holz. Von hier erfolgt das Dickenwachstum des Baumstamms. Das Gewebe, das vom Kambium nach innen neu gebildet wird, wird Holz (Xylem) genannt, was nach außen abgeschieden wird, Bast.

Die Holzmasse füllt den größten Teil des Baumstamms aus. Dabei wird zwischen dem äußeren *Splintholz* und dem, bei vielen Bäumen vorkommenden, inneren *Kernholz* unterschieden. Ersteres ist das junge, lebende Holz und dient der Saft- und Wasserführung von den Wurzeln in die Krone. Das Kernholz ist der abgestorbene Holzteil, gekennzeichnet durch Einlagerungen verschiedener Stoffe (z. B. Gerbstoffe).

Im Zentrum eines jeden Baumes befindet sich das Mark mit dem Markstrang. Dieser ist der in der Mitte des Stammes axial verlaufende Strahl, der aus abgestorbenen, ursprünglich teilungsfähigen Zellen der ersten Triebspitze besteht. Er hat im adulten

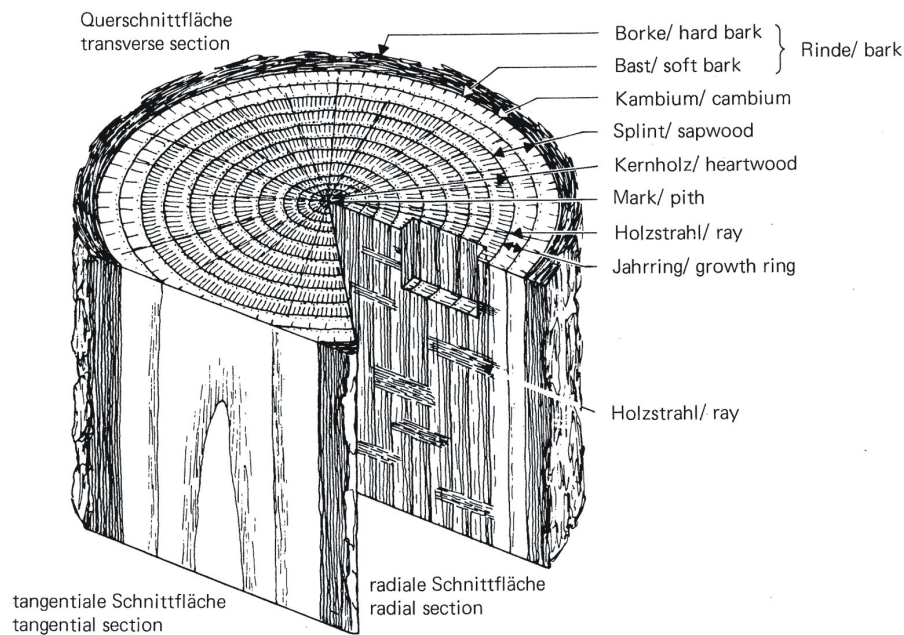


Abbildung 2.1: Aufbau eines Baumes, dargestellt im Querschnitt. Die Rinde schützt den Baum vor äußeren Einflüssen. Neues Gewebe wird im Kambium gebildet und produziert nach innen den Holzkörper. Dieser unterscheidet sich in junges, lebendes Splintholz und abgestorbenes Kernholz. Im Zentrum befindet sich der Markstrang - die erste Triebspitze eines jeden Baumes. (Quelle: *Schweingruber* (1990)).

Baum praktisch keine Bedeutung mehr. Wichtig hingegen sind die radial im Baum verlaufenden Holzstrahlen. Sie dienen zum Transport und zur Speicherung von Assimilaten¹. Dabei wird zwischen primären Holzstrahlen, die direkt im Mark des Holzes beginnen, und den sekundären Holzstrahlen unterschieden. Ziehen sich die Holzstrahlen über das Kambium hinaus bis ins Phloem, werden sie dort Baststrahlen genannt.

2.1.2 Jahrringe

Im Holzkörper lassen sich jährliche Wachstumsphasen (*Jahrringe*) erkennen. Die Zellen im Baum wachsen nicht das ganze Jahr über gleichmäßig. Stattdessen beginnt die Zellbildung im Frühjahr. Dann werden dünnwandige und großlumige² Zellen gebildet, die große Mengen an Wasser und Nährstoffe transportieren können. Dies ist wichtig für die Blattentwicklung. Dieses Holz wird als Frühholz bezeichnet und ist hellfarbig. Im Gegensatz dazu dient das später (Spätsommer) wachsende, dickwandige und englumige Spätholz der Festigkeit des Holzkörpers. Beide Holzgewebe bilden zusammen einen Jahrring. Die Breite eines Jahrrings ist abhängig vom Boden, Klima (Niederschlag und Temperatur), Standort und der Baumart.

¹Assimilate: aufgenommene Stoffe, die in körpereigene Verbindungen umgewandelt werden.

²Lumen: innerer Durchmesser eines röhrenförmigen, hohlen Organs.

2.2 Mikroskopischer Aufbau von Laubholz

2.2.1 Holzzellen

Holz besteht aus verschiedenartigen Zellen. Diese erfüllen im Wesentlichen drei Aufgaben (*Kollmann* (1936), *Trendelenburg und Mayer-Wegelin* (1955), *Bosshard* (1974), *Kempe* (1999)): Wasserleitung, Stoffwechsel (mit Speicherung von Reservestoffen) und Festigung.

Die Tracheen (Gefäßzellen) sind im lebenden Baum für den Wassertransport zuständig. Diese trachealen Zellen sind in axialer Richtung angeordnet und über Öffnungen in der Zellwand (Tüpfel) in tangentialer Richtung miteinander verbunden. Diese Tüpfel bestehen aus einer Tüpfelhöhle und einer Tüpfelmembran (*Grosser* (1977), Abb. 2.2). Es gibt zwei Typen von Tüpfeln, einfache Tüpfel und Hoftüpfel. An aneinandergrenzende Zellen entstehen Tüpfelpaare. Die wichtigsten Arten sind das einfache Tüpfelpaar, das behöftete Tüpfelpaar und das einseitig behöftete Tüpfelpaar.

Bei ersterer ist die Tüpfelhöhle ein einfacher Kanal und verbindet zwei lebende Parenchymzellen miteinander. Hoftüpfel sind zwischen toten wasserleitenden und festigenden Zellen ausgebildet. Eine Randwulst umgibt den Porus als Hof. Der Torus ist der mittlere, verdickte Teil der Tüpfelmembran. Der nicht verdickte, äußere Bereich der Tüpfelmembran (Margo) ist für Flüssigkeiten durchlässig. Bei Druckänderung oder Lufteinbruch in das Zelllumen kann sich der Torus dicht an den Porus legen und den Tüpfel verschließen. Einseitig behöftete Tüpfelpaare kommen zwischen toten Tracheiden und lebenden Parenchymzellen vor.

Im Gegensatz zu den länglichen, geschlossenen Tracheiden sind die Zellwände der röhrenförmigen Tracheen in axialer Richtung aufgelöst, so dass z. T. meterlange, durchgehende Röhren (Gefäße, siehe Abb. 2.3 A) möglich sind. Tracheen kommen nur in Laubhölzern vor und bilden in ihrer Gesamtheit ein Röhrensystem von der Wurzel zu den Blättern.

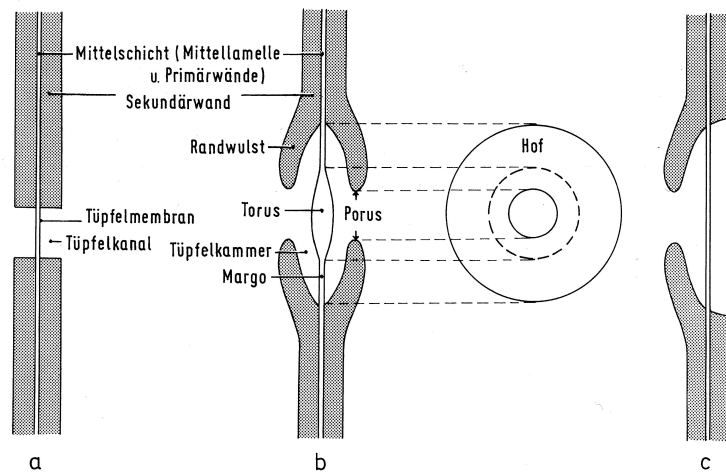
Für die Speicherung und Umwandlung von Reservestoffen wie Fetten, Stärke, Harzen oder auch Gerbsäuren stehen dem Baum die kleinen, dünnwandigen Parenchymzellen zur Verfügung. Sie treten zumeist als Gruppierung um die Gefäße auf und verlaufen quer zur Faserrichtung (siehe auch Abb. 2.4 B).

Den größten Teil im Holz stellen die Fasern dar. Aufgrund der dickeren Zellwände werden diese Zellen auch Stützzellen genannt und sind im Baum für die Festigung zuständig. Sie treten nur bei Laubbäumen auf und beeinflussen im Wesentlichen die Dichte des Holzes.

Während der Holzaufbau bei den Nadelhölzern relativ homogen ist (>91 % Tracheiden), ist er für die höherentwickelten Laubbäume heterogener. Je nach Größe und Anordnung der Gefäße (oft auch Poren genannt) werden Laubbäume in ringporige und zerstreutporige Hölzer unterschieden.

Bei ersterem ist ein deutlicher Übergang von den im Frühjahr gebildeten weiten Gefäßen und den im Herbst gebildeten engen Poren sichtbar. Bei zerstreutporigem Holz sind die Früh- und Spätporen praktisch gleich groß.

Abbildung 2.2: Darstellung verschiedener Tüpfelpaare. a) Einfaches Tüpfelpaar. Es verbindet zwei lebende Parenchymzellen miteinander. b) Hoftüpfelpaar. Sie werden zwischen toten wasserleitenden und festigenden Zellen ausgebildet. c) Ein einseitig behöftes Tüpfelpaar tritt zwischen toten Tracheiden und lebenden Parenchymzellen auf (Quelle: Grosser (1977)).



2.2.2 Aufbau der Zellwand

In der verholzten Zellwand werden fünf Zellwandschichten unterschieden (Dinwoodie (2000), Schwarze et al. (1999)). Die Mittellamelle, die Primärwand und die Schichten der dreiteiligen Sekundärwand (Abb. 2.3 B).

Die *Mittellamelle*, die zwei benachbarte Zellelemente miteinander verbindet, ist weitgehend isotrop und besteht zum großen Teil aus Lignin. Sie ist wichtig für die Stabilität und die Druckfestigkeit der Zellwand. Die daran angrenzende *Primärwand* besteht aus verstreuten Zellulosefibrillen mit einem Gesamtzelluloseanteil von max. 2,5 %. Die *Sekundärwand*, die von der Mittelschicht bis zum Zelllumen reicht, nimmt den größten Teil der Zellwand ein. Sie besteht zu 94 % aus Zellulose und ist damit für die Zugfestigkeit der Zelle verantwortlich. Im Gegensatz zur Primärwand sind in der Sekundärwand die Zellulosefibrillen nicht mehr lose verteilt. Je nach Anordnung wird dabei in drei verschiedene Schichten unterteilt. Die *äußere Sekundärwand* (S_1) ist dünn und weist eine schwache, quer zur Längsachse der Zelle orientierte Paralleltexur auf. Die anschließende *mittlere Sekundärwand* (S_2) nimmt ca. 75 % - 85 % der Gesamtsekundärwand ein, hat einen hohen Zellulosegehalt und ist in konzentrisch angeordneten Lamellen in Richtung der Zellachse aufgebaut. Die *innere Sekundärwand* (S_3) begrenzt die Gesamtzellwand an den Lumen und ähnelt der Primärwand. Sie ist sehr dünn und ihr Zelluloseanteil ist bedeutend geringer als in der S_2 -Wand.

Die Bestandteile der Zellwände sind von großer Bedeutung für den Holzabbau durch Pilze. Diese Auswirkungen werden in Kapitel 2.5 beschrieben.

2.3 Chemische Zusammensetzung von Holz

Holz besteht zum größten Teil (ca. 50 %) aus Kohlenstoff, gefolgt von Sauerstoff (> 43 %) und 6 % Wasserstoff (Kollmann (1936), Trendelenburg und Mayer-Wegelin (1955), Fengel und Wegener (1984)). Die übrigen knapp 1 % verteilen sich auf Stickstoff und mineralische Bestandteile (z. B. Asche). Diese Substanzen gehen chemische Verbindungen ein und bilden die Gerüstsubstanzen von Bäumen. Den größten Anteil im Holz hat die Zellulose (40 - 60 %). Sie ist verantwortlich für die Zugfestigkeit und besitzt eine

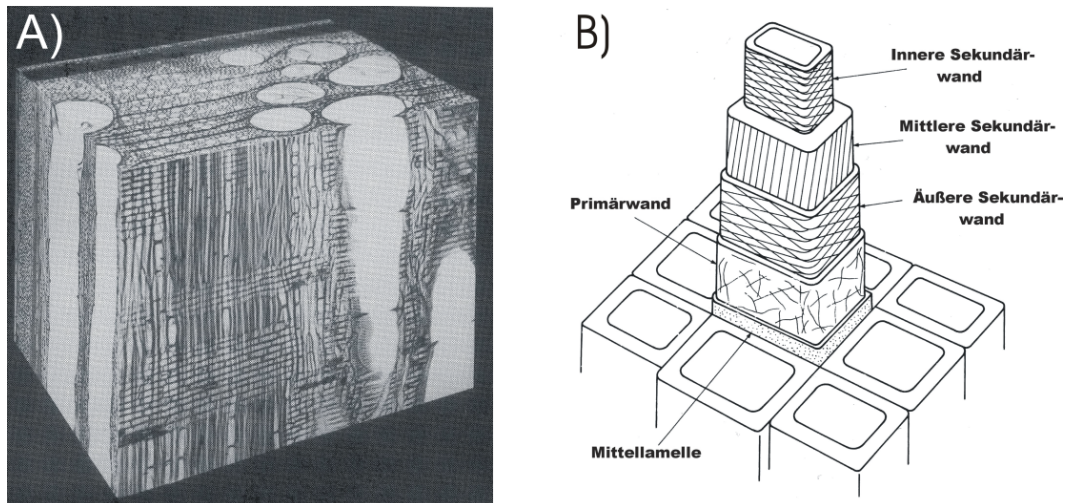


Abbildung 2.3: **A)** zellulärer Aufbau einer Eiche (*Quercus robur*). Deutlich sind die großen, im Frühjahr gebildeten Gefäße zu erkennen, die sich in axialer Richtung ausbreiten. Die Holzstrahlen verlaufen radial (im Bild waagrecht). Ein Jahrring besteht aus den im Sommer großlumigen und im Winter englumigen Zellen. **B)** Vereinfachter Aufbau der Holzzellwände mit der Mittellamelle, der Primärwand und der dreischichtigen Sekundärwand zu erkennen. (Quelle: *Dinwoodie* (2000), z. T. modifiziert)

hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen. Die Hemizellulose ist wichtig zum Aufbau neuer Zellen und ist im Holz mit einem Anteil von 10 - 30 % vertreten. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das zu 20 - 30 % am Zellaufbau beteiligte Lignin. Es wirkt im Holz als Kittstoff und ist wichtig für die Druckfestigkeit. Weitere Nebestandteile (ca. 2 - 7 %) sind unter anderem Harze, Fette, Gerb- und Farbstoffe.

2.4 Physikalische Eigenschaften von Holz

Die physikalischen Eigenschaften von Holz sind sehr vielfältig. Im weiteren wird aber nur auf die für diese Arbeit relevanten Merkmale wie Dichte, Holzfeuchte und elektrische Eigenschaften eingegangen. Als weiterführende Lektüre sei z. B. auf *Niemz* (1993) verwiesen.

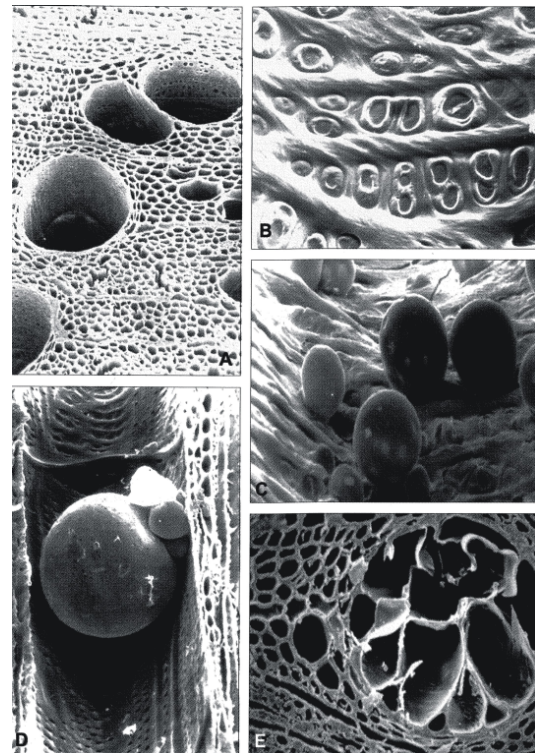
2.4.1 Holzfeuchte

Holz ist ein kapillarporöser Stoff und hat aufgrund des hohen Porenanteils (ca. 50 - 60 %) eine sehr große innere Oberfläche. Es ist in der Lage, Wasser sowohl aus der Luft (hygroskopisches Verhalten), als auch als Flüssigkeit aufzunehmen. Der Feuchtetransport erfolgt sowohl in Faserlängsrichtung als auch quer dazu durch die Tüpfel und Holzstrahlen. Entscheidend für den Feuchtetransport sind sowohl die Durchmesser als auch der Volumenanteil der jeweiligen Elemente (Gefäße, Fasern, Parenchym).

In der Holzforschung werden drei Feuchtigkeitsgrenzzustände unterschieden (Abb. 2.5). Zum einen der *darrtrockene* Zustand. Dabei beträgt die Holzfeuchte 0 %; es ist

Abbildung 2.4:

Rasterelektronenaufnahme von Eichenholz. **A:** zelluläre Querschnittaufnahme mit Frühholzgefäßen. **B:** Tangentialschnitt von Tüpfeln mit angrenzenden, lebenden Parenchymzellen. **C:** Mit zunehmenden Alter der Gefäße oder bei Lufteinbruch bilden sich in den Gefäßen Thyllen (blasenartige Ausstülpungen) aus. Diese wachsen aus den Tüpfeln ins Innere der Gefäße bis sie diese komplett (**D** - Tangentialschnitt, **E** - Querschnitt) verschließen. Das Holz ist nun vertihyllt/verkernt und ein Lufteinbruch nicht mehr möglich. (Quelle: Schwarze et al. (1999))



kein Wasser im Holz vorhanden. Im *Fasersättigungsbereich* sind nur die Zellwände mit Wasser gefüllt, während bei der *Wassersättigung* sowohl die Zellwände als auch die Zelllumen maximal mit Wasser gefüllt sind. Demnach wird der Wasseranteil des Holzes in freies Wasser (Anteil des Wassers über Fasersättigung) und gebundenes Wasser (unter Fasersättigung) unterschieden. Der Fasersättigungsbereich kennzeichnet also den höchstmöglichen Gehalt an gebundenen Wasser. Dieser sinkt mit Erhöhung der Temperatur. Im Durchschnitt liegt er für heimischen Holzarten bei ca. 28 bis 32 %, für Eiche mit 23,5 bis 25,4 % etwas geringer (*Trendelenburg und Mayer-Wegelin* (1955)).

2.4.2 Dichte

Holz ist ein quellfähiges System. Die Dichte im Holz schwankt beträchtlich und hängt stark vom Wassergehalt und der Beschaffenheit des Holzes ab. Bei der Definition der Dichte wird in verschiedene Dichtearten unterschieden. Die am häufigsten verwendeten sind die Rohdichte ρ_u und die Darrdichte ρ_{dtr} . Erstere ist der Quotient aus der Masse des Holzes und dem äußeren Volumen bei einem definiertem Feuchtegehalt u. Die Darrdichte ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen des darrgetrockneten Holzes.

Frisches Holz weist höhere Dichten auf als totes Holz. So wiegt frisches Eichenholz um die 1000 kg/m^3 , während getrocknetes Eichenholz bei 670 kg/m^3 liegt (12 % Feuchtegehalt, *Kollmann* (1951)). Die Dichte ist stark holzartenabhängig, da das Verhältnis zwischen Zellwand und Porenanteil für unterschiedliche Holzarten stark schwankt.

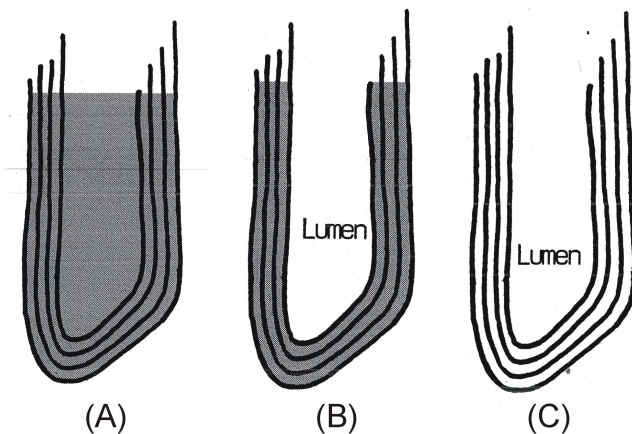


Abbildung 2.5: Drei Feuchtigkeitsgrenzzustände von Holzzellen. **A:** Lumen und Holzzellen sind wassergesättigt. Es herrscht Wassersättigung. Die Feuchtigkeit beträgt bis zu 200 %. **B:** Die Fasern sind wassergesättigt. In den Lumen ist kein Wasser. Es herrscht Fasersättigung. Der Feuchtegehalt beträgt 28 - 32 %. **C:** In den Lumen und Zellwänden ist kein Wasser. Das Holz ist darrtrocken. Die Feuchtigkeit beträgt 0 %. (verändert nach *Kempe* (1999)).

2.4.3 Elektrische Eigenschaften

Holz kann, in Abhängigkeit von der Feuchte, sowohl ein ausgezeichneter Isolator als auch ein guter Stromleiter sein (*Nusser* (1936), *Bosshard* (1974)). Der Wassergehalt im Holz hat aufgrund der hydrophilen³ Zellulose den größten Einfluss auf die Leitfähigkeit. So liegen die spezifischen Widerstandswerte (spezifischer Widerstand = Kehrwert der Leitfähigkeit) für trockenes Holz zwischen 10^{12} und $10^{16} \Omega\text{m}$ (*Du* (1991)) und für Holz bei Fasersättigung um $10^4 \Omega\text{m}$. Bis zur absoluten Sättigung ändert sich der Widerstand dann nur noch um das Fünzigfache. Dabei gibt es von 0 bis ca. 7 % Feuchtigkeit eine lineare Beziehung zwischen dem Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt. Bis zum Fasersättigungsbereich (ca. 30 %) einen linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus des Wassergehalts und dem Logarithmus des elektrischen Widerstands. Oberhalb des Fasersättigungsbereichs ist die Wirkung der Feuchte wesentlich geringer und die elektrische Leitfähigkeit nimmt nur noch gering zu (*Zürcher* (1988)). Bei sehr hohen Feuchtigkeitswerten spielt dafür die Ionen-Konzentration eine zunehmend wichtige Rolle (*Kucera und Niemz* (1986)).

Neben der Holzfeuchte spielt die Temperatur zum Zeitpunkt der Messung eine Rolle (*Skaar* (1964)). Der elektrische Widerstand sinkt mit steigender Temperatur. *Nusser* (1936) gibt an, dass eine Temperaturabnahme um 12°C eine Verdopplung des Widerstands ergibt. Der Temperatureinfluss hängt zudem auch von der Holzfeuchte ab (*Du* (1991)). Bei trockenem Holz ist er am größten und vermindert sich mit steigender Holzfeuchte. Die Ursache des Temperatureffekts ist in dem Aktivierungsprozess der Ionen zu suchen (*Clark und Williams* (1933), *Brown et al.* (1963)). Mit steigender Temperatur lösen sich immer mehr gebundene Ionen und beteiligen sich am Leitungs-transport. Wichtig für die Leitfähigkeit ist der Anteil an freien Ionen, vor allem im Bereich über Fasersättigung, da dort der Wassergehalt weniger ausschlaggebend ist (*Zürcher* (1988)).

Holz ist anisotrop. Die Stärke der Anisotropie variiert mit der Holzart. So ist die Leitfähigkeit in axialer Richtung (Faserrichtung) 2,5 bis 8 mal so hoch wie quer zur Faserrichtung (*Kollmann* (1951), *Du* (1991)). In tangentialer Richtung ist sie hingegen nur wenig kleiner als in radialer Richtung. Die Ursache liegt im Aufbau des

³hydrophil: wasseranziehend, wasserliebend.

Holzes begründet. Die Ionenbeweglichkeit ist in axialer Richtung aufgrund der fibrillären Strukturen der Zellulose und des lamellenartigen Aufbaus der Zellwände viel größer als in den beiden anderen Richtungen. Den Unterschied zwischen der radialen und tangentialen Richtung machen die Holzstrahlen aus, die den Ladungstransport in radialer Richtung vereinfachen.

Auch die Holzart hat einen Einfluss auf die Leitfähigkeit. *Du* (1991) begründet dies mit dem komplexen Zusammenwirken der Faktoren Rohdichte, Aschegehalt, chemische Zusammensetzung, Holzstruktur und pH-Wert. Mit zunehmender Rohdichte steigt die Leitfähigkeit. Ihr Einfluss ist aber so gering, dass er gegenüber der Holzfeuchte und der Temperatur vernachlässigbar ist. Bei den chemischen Bestandteilen spielt nur der Anteil der Zellulose in den amorphen Bereichen für die elektrische Leitung eine Rolle. Dabei soll es eine positive Korrelation zwischen der Leitfähigkeit und dem Zelluloseanteil geben. Auch Extrakte können sich auf die Leitfähigkeit auswirken, da die Elektrolyte im Holz eine Ionenquelle darstellen. Werden diese beispielsweise durch Süßwassereinlagerung entfernt tritt eine starke Abnahme der Leitfähigkeit ein (*Du* (1991)).

Der spezifische Widerstand im Splint- oder Kernholz ist meist unterschiedlich. Hier wirkt sich die Verkernung des Holzes auf den Ionentransport aus. So wird die Permeabilität durch den Verschluss der Tüpfel herabgesetzt. Außerdem erhöht sich der Ligningehalt durch das Verholzen der Tüpfelmembrane. Daraus schlussfolgernd sollte die Leitfähigkeit im Kernholz abnehmen. Das belegen *Shigo und Shigo* (1974) und führen es auf eine höhere Konzentration von Kationen im Splintholz zurück. Allerdings lagern sich im Kernholz auch phenolische Kernstoffe ein und die Zellwände des Kernholzes sind teilweise von Gerbstoffen durchtränkt (*Du* (1991), *Wagenführ* (1999)). Das Kernholz weist dann einen niedrigeren spezifischen Widerstand als das Splintholz auf. Damit wirken sich die eingelagerten Kern- und Gerbstoffe stark auf die Leitfähigkeit des Holzes aus (*Piirto und Wilcox* (1978)).

Daneben gibt es noch eine Vielzahl anderer Einflüsse (z. B. Standort des Baumes), die sich direkt oder indirekt auf die Leitfähigkeit auswirken können. Deren Einfluss ist in der Regel so gering, dass sie von den anderen Einflüssen kaum oder gar nicht zu trennen sind.

2.5 Biologischer Abbau von Holz

Bäume sind potenziell unsterblich (*Holdenrieder* (1994)). In der Natur leben sie aber, aufgrund einer Vielzahl von Umwelteinflüssen, nicht ewig sondern werden von Pilzen, Bakterien und Insekten abgebaut. Dabei kommt es zu chemischen und strukturellen Veränderungen. Die durch die Pilze ausgelösten Holzzersetzungsprozesse werden im Wesentlichen in die drei folgenden Arten unterschieden (*Schwarze et al.* (1999), *Schmidt* (2006)).

2.5.1 Braunfäule

Bei der auch als Destruktionsfäule oder Würfelbruchfäule bekannten Fäuleart wird die Holzstruktur durch den Abbau von Zellulose und Hemizellulose weitestgehend zerstört.

Sie wird durch Pilze der Abteilung Basidiomycota verursacht und tritt zum großen Teil an Nadelbäumen, aber auch an Laubbäumen, z. B. an Eichenkernholz, auf. Das verbleibende Lignin wird leicht verändert und verursacht eine bräunliche Verfärbung des Holzes. Die Zug- und Biegefestigkeiten werden stark herabgesetzt. Es wird davon ausgegangen (*Schwarze et al.* (1999)), dass vor allem durch den frühzeitigen Abbau der Hemizellulose ein schneller und starker Festigkeitsverlust auftritt. Das Holz wird spröde, zerbricht würfelbruchartig und zerfällt pulvrig. Der Abbau der radialen Strukturen in der mittleren Sekundärwand kann ebenfalls Ursache sein. Dabei fungieren sie als Eintrittspforten und werden im Frühstadium bevorzugt abgebaut. Es entstehen zahlreiche feine Risse und Spalten in der Sekundärwand, durch die der Pilz weiter die Zellulose und Hemizellulose abbauen kann. Das Zellwandvolumen nimmt ab. Im Spätstadium bleibt ein Ligningerüst der Zellwände übrig. Vertreter dieser Fäule sind u. a. der Eichenwirrling (*Daedalea quercina*) und der Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*).

2.5.2 Weißfäule

Im Gegensatz zur Braunfäule ist die Weißfäule (Korrosionsfäule) sehr anpassungsfähig. Sie tritt vorwiegend an Laubbäumen auf und hat die Fähigkeit, sämtliche Zellwandbestandteile weitestgehend abzubauen. Durch den vorrangigen Abbau des Lignins erscheint das verbleibende Holz weißlich bis gebleicht. Es wird aber auch die Zellulose und Hemizellulose abgebaut. Je nach Pilzart und den Bedingungen im Holz unterscheidet sich der Abbau der jeweiligen Substanzen erheblich. Daher gibt es eine nochmalige Unterteilung der Weißfäule in die simultane Fäule und die selektive Delignifizierung.

Bei der simultanen Fäule werden die drei Hauptsubstanzen Lignin, Zellulose und Hemizellulose zu gleichen Teilen abgebaut. Dabei wird die Zellwand vom Lumen ausgehend von innen nach außen zerstört. An der innersten Sekundärwand entstehen durch die Pilzhypen⁴ sogenannte Erosionsgräben. Diese graben sich immer tiefer in die Sekundärwand ein, so dass sie diese im weiteren Verlauf durchdringen. Im Spätstadium wird dann auch die Mittelschicht abgebaut. Dies führt zu einem spröden Brechen des infizierten Holzes und zu einer starken Minderung der Biegefestigkeit im Anfangsstadium des Befalls.

Bei der selektiven Delignifizierung wird das Lignin im Anfangsstadium früher abgebaut als die anderen beiden Substanzen. Dadurch kommt es zu einem Abbau der Mittellamelle und der Trennung von Zellelementen aus ihrem Verbund. Als Ergebnis tritt eine Steifigkeitsminderung ein. Das Holz wird faserig. Im späteren Verlauf der Holzzersetzung kommt der Zelluloseabbau dazu. Damit setzt auch eine Minderung der Zugfestigkeit ein. Vertreter der simultanen Weißfäule sind u. a. der Eichenfeuerschwamm (*Phellinus robustus*), der zottige Schillerporling (*Inonotus hispidus*) sowie der echte Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*). Honiggelber Hallimasch (*Armillaria mellea*) und wulstiger Lackporling (*Ganoderma adspersum*) sind dagegen typische Vertreter der selektiven Weißfäule.

⁴Hypen: Zellfäden der Pilze.

2.5.3 Moderfäule

Bei der Moderfäule kommt es bei hoher Holzfeuchte zur Erweichung des Holzes. Trocknet das Holz später ab, kommt es zur Versprödung des Holzes und zu einem Würfelbruch. Die verursachenden Pilze sind neben den Deuteromyceten und Ascomyceten auch die Basidiomyceten. Die Pilzhyphe wachsen innerhalb der Sekundärwand in Richtung der Zellulosemikrofibrillen. Die Zersetzung der Holzzellwände findet in unmittelbarer Nähe der Hyphen statt. Dabei bilden sich Kavernen innerhalb der Zellwand, die als kreisrunde Hohlräume im Querschnitt erkennbar sind. Dies ist charakteristisch für die Moderfäule. Moderfäuleerreger bauen in erster Linie Zellulose ab und in geringen Maßen auch Lignin. Das Holz wird spröde, besitzt aber noch eine hohe Steifigkeit. Moderfäule erregende Pilze sind u. a. der Brandkrustenpilz (*Ustulina deusta*) und der Riesenporling (*Meripilus giganteus*).

2.6 Spezifische Holzeigenschaften von Eiche

Die Gattung *Quercus* (Eiche) besteht aus ca. 450 Arten, wovon jedoch nur ca. 25 in Europa beheimatet sind. Eichen sind, von Ausnahmen abgesehen, sommergrüne Laubbäume, die bis zu 500 (teilweise auch bis zu 1000) Jahre alt werden können. Die am häufigsten in Mitteleuropa anzutreffenden Eichen sind die Stiel-Eichen (*Quercus robur*) und die Trauben-Eichen (*Quercus petraea*). Sie sind Tiefwurzler und gehören zu den ringporigen Kernhölzern. Ihr Splintholzanteil ist sehr gering (bis 5 cm Breite). Das Kernholz der Eiche ist sehr hart und dauerhaft. Es ist durch phenolische Inhaltsstoffe imprägniert, die ihm eine hohe Resistenz verleihen. Die im Frühjahr gebildeten Gefäße sind sehr groß (Durchmesser bis zu $d = 400 \mu\text{m}$, Grosser (1977)) und teilweise im Querschnitt mit dem bloßen Auge sichtbar (Abb. 2.4, Bild A). Der Wassertransport erfolgt fast ausschließlich im jüngsten Jahrring. Alle älteren Frühholzgefäße sind durch Thyllen verschlossen (Abb. 2.4, Bilder C - E) und dienen nur noch der Speicherung (Zürcher (1988)). Die Größe der im Spätholz gebildeten Tracheen nimmt stark ab (bis $d = 25 \mu\text{m}$). Sie sind mit dem bloßen Auge kaum noch wahrnehmbar.

Eiche hat auffällige Holzstrahlen. Neben den kleineren einreihigen Strahlen gibt es auch sehr breite (bis 1 mm) und beträchtlich hohe (einige cm). Die Fasern sind sehr dickwandig, so dass das Lumen nur ca. ein Drittel des Zelldurchmessers erreicht.

Die chemische Zusammensetzung von Eiche ist ca. 55 % Zellulose, ca. 20 % Lignin und ca. 25 % Hemizellulose (Trendelenburg (1939), Fengel und Wegener (1984), unterschiedliche Angaben in Literatur). Dabei existieren noch geringfügige Unterschiede zwischen Kern- und Splintholz. Eiche ist sehr gerbstoffreich. Die Gerbstoffe variieren je nach Standort des Baumes. Der Anteil im Splintholz liegt bei ca. 1 %, im Kernholz jedoch zwischen 5 - 10 %. Diese Gerbstoffe lagern hauptsächlich in den Parenchymzellen der Markstrahlen, kommen aber auch in anderen Zellen und in den Zellwänden vor. Mit zunehmenden Alter steigt der Gerbstoffgehalt des Eichenholzes. Zusätzlich zu den Gerbstoffen werden auch andere Mineralstoffe im Holz gebunden. Ihr Gehalt ist im Splintholz etwa doppelt so hoch wie im Kernholz. Ähnliches gilt für Stickstoff.

2.7 Untersuchung von Bäumen

Es existieren eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden, die sich mit der Stabilität sowie der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen beschäftigen. Die Fülle dieser Messmethoden bewirkt eine unterschiedliche Vorgehensweise unter Fachleuten. Um diese weitestgehend zu vereinheitlichen, wurde die Baumkontrollrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL, *Baumkontrollrichtlinie* (2004)) herausgegeben. Sie beschreibt die regelmäßige Kontrolle von Bäumen. Dabei ist die Sichtkontrolle durch fachlich qualifizierte Inaugenscheinnahme vom Boden aus i. d. R. der erste Schritt. Dies geschieht in vielen Fällen nach der VTA Methode (Visuell Tree Assessment, *Mattheck und Hötzel* (1999)). Reicht bei begründetem Verdacht auf innere Baumschäden, wie z.B. Fäule, die visuelle Kontrolle nicht mehr aus, wird im zweiten Schritt zu einer genaueren Überprüfung mit Hilfe von Messinstrumenten übergegangen. Einige der häufig verwendeten Verfahren werden auf den nächsten Seiten näher beschrieben. Eine gute Zusammenstellung der verschiedenen Diagnosemethoden ist nachzulesen bei *Brandt und Rinn* (1989), *Niemz et al.* (1998), *Kucera und Niemz* (1998), *Hanskötter* (2003) sowie aktuell bei *Hasenstab* (2005) und *Rust und Weihs* (2007).

2.7.1 Bohrkernentnahme

Die Bohrkernentnahme am lebenden Baum dient vor allem der Bestimmung des Zuwachses aber auch zur Identifizierung von Pilzen aus der befallenen Region des Baumes. Die Entnahme erfolgt durch sogenannte Zuwachsbohrer, die häufig einen Durchmesser zwischen 4 und 6 mm haben (*Niemz et al.* (1998), *Hanskötter* (2003)). Die Anwendung des Verfahrens ist invasiv und damit nicht zerstörungsfrei, trotzdem ist sie in Baumpflegerkreisen stark verbreitet. Die Vorteile liegen in der eindeutigen Bestimmung der Fäuleart und der Erfassung verschiedener Festigkeitsparameter an der Probe. Nachteil ist die nur punktuelle bzw. lineare Betrachtung sowie die damit einhergehende Schädigung durch den Bohrkanal. So ergibt eine Bohrkernentnahme viel Information an der Entnahmestelle, sagt aber wenig über den Zustand des gesamten Baumes aus. Von daher sollten mindestens rechtwinklig zueinander angeordnete Bohrkernentnommen werden. Dabei erhöht sich das Fäulerisiko durch die Verletzung beträchtlich. Dieses Risiko hängt vom Zeitpunkt der Messung und der jeweiligen Vitalität des Baumes ab (*Dujesiefken und Liese* (1990), *Dujesiefken et al.* (1991)). So sollten während der Ruhephasen bei Laubbäumen Pflege- und Untersuchungsmaßnahmen wegen der schlechten Kompartimentierung⁵ möglichst vermieden werden. Der Arbeitsaufwand ist mit 5 - 10 min pro Bohrung verhältnismäßig hoch und die Trefferquote der Fäulediagnose geben *Niemz et al.* (1998) bei ihren Untersuchungen mit 46 % an.

2.7.2 Bohrwiderstand

Ein weitverbreitetes Verfahren ist die Untersuchung des Bohrwiderstand (BWS). *Gruber* (2001) vergleicht in seiner Arbeit zwei gängige BWS-Methoden, den *Teredo* und

⁵Kompartimentierung: Fähigkeit des Baumes zur Abschottung von infizierten Stellen.

den *Resistographen*. Bei ersterem wird mit einer 1 m langen und 0,8 mm dünnen Stahlnadel mit verdicktem kegelförmigen Bohrkopf der Bohrwiderstand über die Stromaufnahme eines Rotationsmotors aufgenommen. Dabei brennt sich der Bohrkopf aufgrund der hohen Reibungswärme quasi ins Holz hinein. Beim Zurückziehen der Prüfnadel aus dem Holz wird zusätzlich der Rotationswiderstand entlang des Bohrkanals aufgezeichnet, so dass neben der Vorschubkurve auch eine Rückzugskurve aufgezeichnet wird.

Beim *Resistographen* wird mit einer 1 - 3 mm dicken Nadel radial bis zu 150 cm in den Baum gebohrt. Gemessen wird bei gleichbleibender, einstellbarer Vorschubgeschwindigkeit die Leistung des Antriebsmotors, der gegen den Weg der Bohrnadel aufgetragen wird. Der Eindringwiderstand wird in dimensionslosen Bohrwiderstandseinheiten angegeben.

Der Bohrwiderstand kann in beiden Fällen Auskunft geben über die Struktur und den Aufbau im Inneren und ist im Wesentlichen abhängig von der Holzdichte und der Holzfeuchte. So haben *Eckstein und Saß* (1994) festgestellt, dass eine Braunfäule im Vergleich zur einer Weißfäule bereits bei geringeren Masseverlust des Holzes eine Erniedrigung des Bohrwiderstands verursacht. Jedoch ist gerade für Laubhölzer eine genauere Interpretation der Daten schwierig, da auch die artspezifische Holzanatomie eine Rolle spielt, die bei Laubhölzern wesentlich komplexer ist als bei Nadelbäumen. *Rinn et al.* (1996) geben außerdem als Grenzen für das System eine Auflösegenauigkeit von Jahrringen bis zu einer Größe von ca. 0,5 mm an. Die BWS-Methode ist gleichfalls invasiv, es wird jedoch von einem geringeren Infektionsrisiko als bei der Bohrkernentnahme ausgegangen, da der Bohrkanal sehr dünn ist und die Nadel starke Reibungsenergie entwickelt. Allerdings zeigt das Holz nach jeder Bohrung eine Verfärbung, durch die, gerade bei schlecht abschottenden Bäumen, Pilze ins Innere dringen können (*Jaskula und Blatt* (2001), *Kersten* (2001)). Daher sollte sparsam mit der BWS-Methode umgegangen werden und mehrere Untersuchungen innerhalb kürzester Zeit vermieden werden, da sie den Baum schädigen. Allerdings wird von *Rust und Weihs* (2007) empfohlen, bei jeder Untersuchung mindestens drei Messungen durchzuführen, um eine relativ zuverlässige Einschätzung vom Bauminneren geben zu können. Die Interpretation von Bohrwiderstandsdaten ist aufgrund der vielen Einflussgrößen und Fehlerquellen nicht einfach und sollte von einem erfahrenen Gerätenutzer durchgeführt werden (*Wenzel* (1999)).

Die Methode des Bohrwiderstands findet nicht nur in baumgutachterlichen Kreisen Anwendung, sondern wird auch als weitgehend zerstörungsfreie Untersuchungsmethode an verbaute Holz verwendet. So können verdeckt liegende Schäden durch Pilz- oder Insektenbefall lokalisiert werden. Allerdings erfordert sie auch hier einen erfahrenen Messingenieur (*Görlacher und Hättich* (1992)).

2.7.3 Schallverfahren

Eine fast-zerstörungsfreie akustische Untersuchungsmethode besteht in der Erfassung von Schalllaufzeiten im Holz. Dadurch, dass sich Schall im gesunden, festen Holz schneller ausbreitet als in stark zersetztem Holz, sollte es theoretisch möglich sein, defekte Stellen im Inneren des Baumes zu detektieren. Das Schallfeld wird beeinflusst durch die physikalischen Eigenschaften der Zellwände wie Dichte, Festigkeit, Form und Größe der Fasern sowie einiger anderer Parameter. Holz verfügt außerdem über Strukturen eines

großen Längenskalenbereich, der je nach akustischer Wellenlänge die Schallausbreitung beeinflusst. So existieren sowohl großskalige Objekte im Meterbereich (z.B. langgestreckte Lumen), als auch Objekte im Millimeter- (Jahrringe) und Mikrometerbereich (Zellen) bis hin zum Nanometerbereich (Zellulosekristalle u.ä.).

Bei dem Schallverfahren werden für gewöhnlich an gegenüberliegenden Stellen des Baumes ein Sender und ein Empfänger angebracht. Die Anregung erfolgt in vielen Fällen manuell durch Hammerschlag (z.B. Impulshammer, Stoßanregung). Dadurch wird ein Wellenimpuls ausgelöst. Es entstehen aufgrund der starken Anisotropie des Holzes drei Wellenarten, deren Ausbreitungsgeschwindigkeiten richtungsabhängig sind. Das bedeutet, dass in jede der drei anatomischen Richtungen bis zu drei Wellenarten auftreten können: eine schnelle Quasi-Longitudinalwelle (Kompressionswelle) und zwei Quasi-Transversalwellen (Scherwellen), eine schnellere und eine langsamere. Diese Scherwellen entstehen in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung in Bezug auf die Faserrichtung (*Hasenstab* (2005)).

Das anisotrope Ausbreitungsverhalten von Schall im Holz ist vom Fortpflanzungsverhalten der akustischen Wellen und von der Struktur des Holzes abhängig und wird in sogenannten Slownesskurven beschrieben. *Bucur et al.* (2002) erklären, dass aus akustischer Sicht die Holzstruktur als ein rechtwinkliges System sich kreuzender Röhren (Zellulosefasern) angesehen werden kann, die in einer (Lignin-)Matrix eingebunden sind.

In der Praxis wird bei der Erzeugung des Signals (mechanischer Impuls) von einer einfachen Deformationswelle ausgegangen (*Haaben et al.* (2006)). Der dabei nutzbare Wellenlängenbereich ist aufgrund der Holzstruktur eingeschränkt. Eine Welle, die durch gesundes Holz läuft, wird i. d. R. immer schneller ankommen als eine Welle, die sich um einen geschädigten Bereich (mit geringerer Schallgeschwindigkeit) herum ausbreitet. *Haaben et al.* (2006) schreiben, dass die radialen Geschwindigkeiten bei den untersuchten Baumarten größer sind als die tangentialen. Für Eiche liegt der Unterschied bei ca. 12%. Des Weiteren gibt es auch Unterschiede in den longitudinalen Geschwindigkeiten für kambiumnahes (Splintholz) und marknahes Holz (Kernholz). Diese Geschwindigkeiten sind für Eiche im Kernholz (mit ca. 2540 m/s) etwas höher als im Splintholz (ca. 2390 m/s). Eiche hat aber gleichzeitig die niedrigsten longitudinalen Geschwindigkeiten aller von *Haaben et al.* (2006) untersuchten Bäume. Ferner fanden sie eine Temperaturabhängigkeit sowie eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten von der Sensorpositionierung.

Untersuchungen zur Eignung der Schallmessungen für die Lokalisierung von Fehlstellen wurden z.B. von *Niemz et al.* (1999a), *Wang et al.* (2000) und *Niemz et al.* (2002) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass zur Erkennung von Schädigungsbereichen diese in Ausbreitungsrichtung des Schalls liegen und genügend groß sein müssen, so dass eine erkennbare Änderung der Schallgeschwindigkeit vorhanden ist. Diese ist aber ohnehin schon von vielen Faktoren abhängig, vor allem vom Elastizitätsmodul und der Rohdichte, aber auch von der Anordnung der Sensoren (*Hasenstab* (2005)), der Messfrequenz, der Holzfeuchte (*Niemz* (1996)), der Richtung des Faserwinkels (*Niemz et al.* (1999b)) und der Geometrie des Stammquerschnitts (*Schwarze et al.* (2004)). So folgern *Niemz et al.* (1998), dass die genaue Lage und Größe eines Defektes nicht durch eine einmalige Schallmessung erfasst werden kann. *Tomiczek* (1996) gibt in sei-

nen Untersuchungen zur Abschätzung von Rotfäule an Fichte mit dem Impulshammer eine Trefferquote von 76,5 % an. Unter Berücksichtigung einiger der oben genannten Faktoren kann nur eine begrenzte Aussage zum Defektausmaß gemacht werden.

Um diese Sicherheit zu erhöhen, wurde in den letzten Jahren die Schalltomographie auf Bäume adaptiert. Dabei werden mehrere Sensoren (üblicherweise 8 - 12) ringförmig in konstantem Abstand um den Baum angebracht. Jeder Sensor wird als Sender und Empfänger genutzt. Wird an einem Sender durch Hammerschlag angeregt, zeichnen alle anderen Sensoren als Empfänger auf. Geschieht dies reihum, kann durch die zusätzliche Erfassung der Abstände der Sensoren zueinander ein zweidimensionales Abbild der relativen Schallgeschwindigkeiten erreicht werden. Als Sensoren werden dabei kleine Metallstifte bzw. Nägel verwendet, die durch die Rinde ins Holz geschlagen werden. Dabei konnten *Rust et al.* (2002) zeigen, dass Defekte ab einer Fläche von 10 % des Stammquerschnitts und 10 cm Durchmesser (zumindest für Moderfäule) sicher gefunden werden konnten. *Gilbert und Smiley* (2004) fanden des Weiteren, dass bei höherer Dichte des Holzes kleinräumigere Defekte gefunden werden konnten. Allerdings ist auch hier die kleinste mögliche messbare Ausdehnung mit 5 - 10 cm angegeben. Eine genauere Auflösung von kleinräumigen Schädigungszonen lässt sich mit einer Erhöhung der Sensoranzahl erreichen (*Haaben et al.* (2006)).

2.7.4 Elektrische Verfahren

Parallel zu den akustischen Methoden haben sich die elektrischen Verfahren entwickelt. Diese beruhen auf den elektrischen Eigenschaften des Holzes (Kap. 2.4), die mit dem Wassergehalt und bei Fäulebefall mit dem Kationengehalt variieren (*Brandt und Rinn* (1989), *Kucera und Niemz* (1998)).

Schon 1930 berichtete *Stamm* (1930) über ein elektrisches Gerät zur Erfassung des Feuchtigkeitsgehaltes in Holz. *Shigo und Shigo* (1974) entwickelten zum Nachweis von Fäule das Shigometer. Dabei wird durch ein vorher gebohrtes Loch im Holz eine Messsonde eingeführt und in Abhängigkeit von der Tiefe mit einer pulsierenden Gleichstromquelle der Widerstand gemessen. Dabei ergeben sich im Splintholz Werte zwischen 200 und 300 k Ω , im Kernholz steigt der Widerstand und im Fäulebereich sinkt er auf ein Minimum (*Brandt und Rinn* (1989)). *Shigo und Shigo* (1974) konnten damit verfärbtes und geschädigtes Holz durch einen abrupten Abfall im Widerstand nachweisen. Allerdings treten beim Anbohren von Nasskernen Probleme auf, da herausfließendes Wasser die Messwerte veränderte (*Zürcher* (1988)). Die größte Beeinträchtigung sehen *Piirto und Wilcox* (1978) in der großen Schwankungsbreite der Messwerte, die ihrer Meinung nach keine eindeutigen Rückschlüsse auf Schadstellen zulassen.

Ein weiteres elektrisches Verfahren zur Fäuleansprache ist der Vitamat. Dabei werden aus dem Feuchtegehalt des Baumes Rückschlüsse auf die Baumvitalität gezogen (*Brandt und Rinn* (1989)). Das Messprinzip ist ähnlich dem Shigometer. Dazu werden zwei 3,5 bis 4,5 mm starke Elektroden 15 - 17 cm in das Holz getrieben und während des Eintreibvorgangs die Leitfähigkeit gemessen. Bei beiden Verfahren erfolgt eine linienförmige Messung sowie eine Schädigung des Baumes durch den Bohrkanal (ähnlich den bohrenden Verfahren). Probleme bereiten Bakterien im Baum, die eine Änderung der Leitfähigkeiten hervorrufen, jedoch nicht zur Fäule führen. *Kucera und Niemz* (1986)

weisen außerdem darauf hin, dass sich die Zeitspanne zwischen dem Einbringen der Elektroden und die Temperatur auf die Messergebnisse auswirken. Die Länge der nicht isolierten Elektrodenspitzen hat allerdings keinen Einfluss. Die Reproduzierbarkeit der Daten im gleichen Bohrloch nach einer längeren Zeitspanne ist jedoch nicht gegeben. *Bucher et al.* (1993) haben für 24 verschiedene Baumarten bzw. Baumgattungen systematisch charakteristische Leitwertprofile für den Vitamat aufgeführt. Sie kommen zu dem Schluss, dass der Vitamat ein feldtaugliches Gerät ist, um Pilz- und Bakterienbefall im Holz aufzudecken und das Ausmaß abzuschätzen. Bei der Interpretation sind jedoch holzartspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen und die Daten auf die Standardleitwertprofile zu stützen. Zusätzliche Kenntnisse wie z. B. Standort und Baumalter sind ebenfalls notwendig. Dieses Verfahren gilt als weitgehend zerstörungsfrei, da der Stichkanal nicht so tief ist und sich nach Rückzug der Elektroden aufgrund der Elastizität des Holzes wieder schließt (*Niemz et al.* (1998)).

Wie bei dem Schallverfahren wurde auch für die elektrische Methode tomographische Abbildungsverfahren entwickelt. Dabei werden bis zu 24 Elektroden äquidistant ringförmig um den Baum angeordnet. Durch Einspeisen eines Gleichstroms an zwei Messelektroden (Stromdipol) wird ein elektrisches Feld induziert. An allen anderen Elektroden (Spannungsdipole) wird die Spannungsdifferenz gemessen. Daraus wird unter Berücksichtigung der Geometrie der spezifische elektrische Widerstand berechnet. Durch Rückrechnung (Inversion) der gemessenen Daten wird ein zweidimensionales Abbild des Baumquerschnitts erzeugt. 1999 wurden erste Versuche zur Diagnose von Farbkernen an Rotbuchenstämmen (*Weihs et al.* (1999)) und zur zweidimensionalen Darstellung an Fichte (*Dubbel et al.* (1999)) unternommen. Beide Veröffentlichungen kommen zu dem Fazit, dass die Methode Potenzial für weitere Aussagen bietet. Tiefergehende Untersuchungen führte *Hanskötter* (2003) durch. Sie kommt zu dem Schluss, dass die Rotkerndiagnose an Rotbuchen mit absoluten Widerstandswerten schwierig ist. Die individuellen Unterschiede des elektrischen Widerstands von Rotbuchen, selbst innerhalb eines Bestandes, sind zu groß. *Bieker et al.* (2007) dagegen schreiben, dass die elektrische Widerstandstomographie hervorragend für die Diagnose verschiedener Stadien der Holzzersetzung durch Pilze geeignet ist. Als Ergebnis ihres Versuches, Eschen mit dem Weißfäuleerreger *Trametes versicolor* zu infizieren und dieses mittels elektrischer Tomographie nachzuweisen, lässt sich feststellen, dass die elektrisch gut leitenden Bereiche mit zunehmender Entfernung von der Verwundungsebene in ihrer Ausbreitung abnehmen und diese mit der optisch abgrenzbaren Fäule auf den gefällten Stammscheiben übereinstimmt.

Neben den Untersuchungen aus holzwissenschaftlicher Sicht wurden in den letzten Jahren auch zunehmend tomographische Untersuchungen mit geophysikalischen Hintergrund veröffentlicht. Bei *Just* (2002) fanden dabei elektrische Tomographiemessungen an Buche, Fichte und Linde statt. *Tiitta et al.* (2003) haben elektrischen Impedanzuntersuchungen durchgeführt, um den Effekt der physikalischen (Feuchtegehalt, Dichte) und chemischen (phenolische Einlagerungen, Harzsäuren) Eigenschaften auf das elektrische Verhalten an Kiefernstücken (*Pinus sylvestris* L.) nachzuweisen. Dabei stellten sie fest, dass der Feuchtegehalt einen großen Einfluss über den gesamten Frequenzbereich (5 kHz bis 1 MHz) hat. Außerdem gab es eine Korrelation zwischen Dichte und dem elektrischen Verhalten bei hohen Frequenzen im Splintholz ohne akzessorische

Bestandteile⁶. Kernholzproben mit vielen akzessorische Bestandteilen waren dagegen verschiedenartig beeinflusst von ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Allgemein zeigte sich, dass bei wenigen akzessorischen Bestandteilen die Leitfähigkeit vornehmlich vom Feuchtegehalt beeinflusst wird.

Neben Radar und Seismik (Schalluntersuchungen) wurden von *al Hagrey* (2006) auch Gleichstromwiderstandsmessungen an Bäumen durchgeführt. Bei einem Vergleich der Messanordnungen kam er zu dem Schluss, dass die Dipol-Dipol-Auslage (Stromdipol neben Spannungsdipol, siehe Kapitel 4.3.1) besser für Baummessungen geeignet ist als die Wenner-Auslage (Spannungsdipol zwischen dem Stromdipol). Des Weiteren fand er für alle untersuchten, gesunden Bäume eine konzentrische Ringstruktur mit hohen spezifischen Widerständen in der Mitte und abnehmenden spezifischen Widerständen zur Peripherie hin. Infizierte und geschädigte Bereiche im Baum zerstören diese Ringstruktur und verursachen chaotische Strukturen (*al Hagrey* (2007)).

Bei keiner der oben aufgeführten elektrischen Tomographien wurde die Querschnittsgeometrie berücksichtigt. Diese spielt aber mitunter eine wichtige Rolle. *Nicolotti et al.* (2003) haben daher bei ihren tomographischen Vergleichen festgestellt, dass trotz vieler sehr guter Ergebnisse einige spezifische Widerstandswerte unglaublich sind, unter anderem aufgrund der Geometrie des Baumes. Diese sollte daher berücksichtigt werden.

2.7.5 Weitere Verfahren

Die zerstörungsfreie, aber sehr aufwändige Computer-Tomographie (CT, Röntgen) liefert den Absorptionsgrad als Maß für die technisch-physikalischen und biologischen Eigenschaften des Holzes (*Habermehl und Ridder* (1996)). Die Auflösung der zweidimensionalen Schnittbilder liegt bei ca. 1 cm. Allerdings ist die Interpretation teilweise noch unklar, da beispielsweise sowohl die Zunahme der Holzfeuchte als auch die Zunahme der Dichte die Strahlung zum Teil stark absorbiert (*Niemz et al.* (1998)).

Mit dem Thermographieverfahren kann die Wärmestrahlung an der Oberfläche der Bäume berührungslos erfasst und ebenfalls als Bild dargestellt werden. Der infrarote Strahlungsbereich liegt im Wellenlängenbereich zwischen 8 μm und 12 μm (*Niemz et al.* (1998)) und es können kleinste Wärmekontraste aufgelöst werden. Mit Thermographie sind keine Aussagen über innere Schäden möglich, da äußere Einflüsse (Wind, Sonne, Verdunstung) die Wärmeabstrahlung aus dem Inneren überlagern.

Die dielektrischen Eigenschaften von Holz können mit dem Impulsradar oder der Mikrowellendiagnostik untersucht werden. Dabei werden die Wellen im Gigahertzbereich angeregt und aus Transmission, Reflexion, stehenden Wellen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Laufzeiten Informationen gewonnen (*Kucera und Niemz* (1998)). Dies ist möglich, weil sich die Anisotropie des Holzes auch in seinen elektromagnetischen Eigenschaften bemerkbar macht (*Brandt und Rinn* (1989)). Vorteil dieser zerstörungsfreien Methode ist ihr hohes Auflösungsvermögen (*Bucur* (2004)).

⁶akzessorische Bestandteile: Holzinhaltstoffe die nicht zu den Strukturelementen der Zellwand gehören. Zum Beispiel Gerbstoffe, Harze, Farbstoffe, mineralische Einlagerungen.

Eine weitere, absolut zerstörungsfreie Untersuchungsmethode ist die Kernspintomographie, die sich die Wechselwirkung des magnetischen Moments (Spin) der Wasserstoffatome zunutze macht (*Brandt und Rinn* (1989)). Als Ergebnis entsteht ein Schnittbild, dessen Intensität dem freien Wassergehalt im Gewebe proportional ist (*Kucera und Niemz* (1986)). Die Auflösung liegt bei 0,3 mm².

3 Die komplexe elektrische Leitfähigkeit

3.1 Elektrische Leitfähigkeit

3.1.1 Grundlagen

Die Maxwell'schen Gleichungen beschreiben die physikalischen Grundlagen der klassischen elektrodynamischen Theorie. Dabei stehen die magnetische Feldstärke \mathbf{H} ¹ und die elektrische Flussdichte \mathbf{D} in folgendem Zusammenhang:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_L + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} . \quad (3.1)$$

Mit \mathbf{J}_L als Leitungsstromdichte und $\mathbf{J}_V = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ als Verschiebungsstromdichte hängen die Wirbel des Magnetfeldes von der Summe der Stromdichten $\mathbf{J} = \mathbf{J}_L + \mathbf{J}_V$ ab. In einem homogenen und isotropen Medium ist die elektrische Flussdichte \mathbf{D} proportional zur elektrischen Feldstärke \mathbf{E} und ergibt mit der Dielektrizitätszahl ϵ im isotropen Dielektrikum

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} . \quad (3.2)$$

Dabei gilt: $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$. ϵ_0 ist dabei die elektrische Feldkonstante und ϵ_r die materialspezifische Permittivitätszahl.

Mit der elektrischen Leitfähigkeit σ ist das allgemeine Ohmsche Gesetz

$$\mathbf{J}_L = \sigma \mathbf{E} , \quad (3.3)$$

oder für den elektrischen Widerstand $\rho = 1/\sigma$

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}_L . \quad (3.4)$$

Im allgemeinen Fall sind sowohl die Leitfähigkeit σ als auch die Dielektrizitätszahl ϵ Tensoren zweiter Stufe und beschreiben die nichtisotropen Abhängigkeiten des elektrischen Stroms von der elektrischen Feldstärke. Für die Annahme eines isotropen Mediums hingegen, in dem σ und ϵ ortsunabhängig sind, können sie als skalare Größen betrachtet werden.

Wie Gleichung 3.1 zeigt, setzt sich die Stromdichte aus Leitungs- und Verschiebungsstromdichte zusammen. Erstere wird verursacht durch den Fluss von elektrischen Ladungsträgern wie Elektronen oder Ionen. Die Verschiebungsstromdichte wird durch die zeitliche Änderung des elektrischen Flusses bestimmt und ist frequenzabhängig.

¹Vektoren sind als fettgedruckte Zeichen erkennbar

Für ein zeitlich veränderliches, elektrisches Feld $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$ mit $i = \sqrt{-1}$ und der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ mit als f = Frequenz ergibt sich aus den vorangegangenen Gleichungen:

$$\mathbf{J} = \sigma^* \mathbf{E} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon^* \mathbf{E} = \left[\sigma^* + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon^* \right] \mathbf{E}. \quad (3.5)$$

Im Allgemeinen sind sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch Dielektrizitätszahl komplexe, frequenzabhängige Größen, da neben der elektrischen Leitung auch Polarisation auftritt. Sie lassen sich schreiben als:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad \text{und} \quad \sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (3.6)$$

mit $\epsilon'(\omega)$ und $\sigma'(\omega)$ als Realteile und $\epsilon''(\omega)$ und $\sigma''(\omega)$ als Imaginärteile. Letzterer wird im Allgemeinen durch Polarisierungseffekte im Niederfrequenzbereich bestimmt.

3.1.2 Leitfähigkeitsmechanismen

Die Leitfähigkeit von Stoffen hängt von der Anzahl und der Beweglichkeit der Ladungsträger ab. Die Spanne der Leitfähigkeit von in der Natur vorkommenden Materialien reicht über einen Bereich von ca. 25 Dekaden (*Knödel et al.* (2005)). Sie ist im Wesentlichen abhängig von der Wassersättigung, der Geometrie des Porenraumes bzw. des Zellraumes und der im Poren-/Zellraum gelösten Stoffen. Zu der Gesamtleitfähigkeit tragen drei Leitfähigkeitsmechanismen bei.

Elektronische Leitfähigkeit

Die elektronische (metallische) Leitfähigkeit wird durch den Leitungstransport von freien Elektronen verursacht. Für die meisten gesteinsbildenden Minerale und für Holz ist diese Leitfähigkeit sehr gering, da nur sehr wenige, frei bewegliche Elektronen in der Matrix von Gesteinen verfügbar sind. In der Natur kommen hohe elektronische Leitfähigkeiten praktisch nur an Erzmineralien und Graphit vor. Für Untersuchungen an Holz spielt diese Leitfähigkeit für gewöhnlich keine Rolle.

Elektrolytische Leitfähigkeit

Bäume besitzen (je nach Jahreszeit und Alter) wässrige Lösungen in ihren Holzzellen. Darin befinden sich zum großen Teil gelöste Salze (Nährstoffe). Die Anzahl der darin verfügbaren Ionen hängt von der Temperatur und der Menge löslicher Stoffe ab. Der Ladungstransport geschieht durch die im Zellfluid befindlichen Ionen. Sind die Holzzellen untereinander verbunden, so stellt die elektrolytische Leitfähigkeit den Hauptteil der Gesamtleitfähigkeit dar. Sie hängt stark von der Geometrie der Holzzellen ab und wird beeinflusst von der Porosität und Tortuosität. *Archie* (1942) beschreibt diese Beziehungen für Gesteine und ihre Porenräume durch

$$\frac{\rho_G}{\rho_f} = F = \frac{a}{\Phi^m} \quad (3.7)$$

mit dem spezifischen Widerstand der Gesteinsmatrix ρ_G , dem spezifischen Widerstand des Fluids im Gestein ρ_f und dem Formationsfaktor F . Φ ist die Porosität und m ein

empirisch ermittelter Wert, der abhängig ist von der Geometrie der Leitungsbahnen im Gestein und dem Gesteinsaufbau. In der Regel liegt er zwischen 1,3 (Lockergestein) und 2 (stark zementiertes Gestein). a ist ein zweiter empirischer Parameter, der bestimmt ist durch die Porenkanalgeometrie und strukturellen Eigenschaften.

Sind Gesteine, Sedimente oder Holzzellen teilgesättigt, so wird ihre Leitfähigkeit überwiegend durch das Porenfluid und die Geometrie des Poren-/Zellraumes bestimmt. Für nicht tonhaltige Gesteine wurde ein weiteres empirisches Gesetz ermittelt, welches den Anteil der Poren und ihrer Fluidfüllung berücksichtigt:

$$\rho_G = a\Phi^{-m}S^{-n}\rho_f = F\rho_fS^{-n}. \quad (3.8)$$

Dabei ist S die Sättigung. Der Sättigungsexponent n ist für die meisten Gesteine 2 und ist u. a. abhängig von der Verteilung des Fluids in den Porenräumen (*Schön* (2004)). Bei Teilsättigung steigt der spezifische Widerstand an, da Lufteinschlüsse die Leitfähigkeit herabsetzen.

Grenzflächenleitfähigkeit

Die Grenzflächenleitfähigkeit beruht auf der Wechselwirkung der Porenfluids mit der Gesteinsmatrix (bzw. des Zellwassers mit der Zellwand). An den Grenzflächen bildet sich eine elektrische Doppelschicht (siehe Abb. 3.1) aus. Entsprechend wird Gleichung 3.8 um die Grenzflächenleitfähigkeit σ_Q erweitert zu

$$\sigma_G = \frac{1}{F}\sigma_fS^n + \sigma_Q. \quad (3.9)$$

Diese Doppelschichten sind Ursachen der Polarisierung. Durch ihr komplexes, frequenzabhängiges Verhalten bei Wechselstrom ist es theoretisch möglich, von dem Gesamtwiderstand auf die Porosität Φ und die innere Gesteinsoberfläche zu schließen (*Börner et al.* (1996)). Dabei ist, ausgehend von einem einfachen Modell mit Parallelschaltung, die Porosität proportional zur Leitfähigkeit (Realteil) und die innere Gesteinsoberfläche proportional zum Imaginärteil der Leitfähigkeit. Bei niedrigen Frequenzen (<1 Hz) wird der Imaginärteil fast ausschließlich von der Grenzflächenleitfähigkeit beeinflusst. Eine Trennung der Leitfähigkeitsanteile kann des Weiteren eine Bestimmung hydraulischer Kenngrößen ermöglichen (*Börner et al.* (1996)).

Wassersättigung

Ausgehend von dem vereinfachten Modell, dass die elektrolytischen und die Grenzflächenleitfähigkeitsmechanismen parallel wirken, lässt sich die Gesamtleitfähigkeit aus Term 3.9 bei Vollsättigung schreiben als

$$\sigma_G = \frac{\sigma_f}{F} + \sigma_Q. \quad (3.10)$$

Für den IP typischen, niedrigen Frequenzbereich lässt sich die komplexe Leitfähigkeit auch schreiben als (*Lesmes und Frye* (2001))

$$\sigma_G = [\sigma_f + \sigma'_Q(\omega)] + i\sigma''_Q(\omega). \quad (3.11)$$

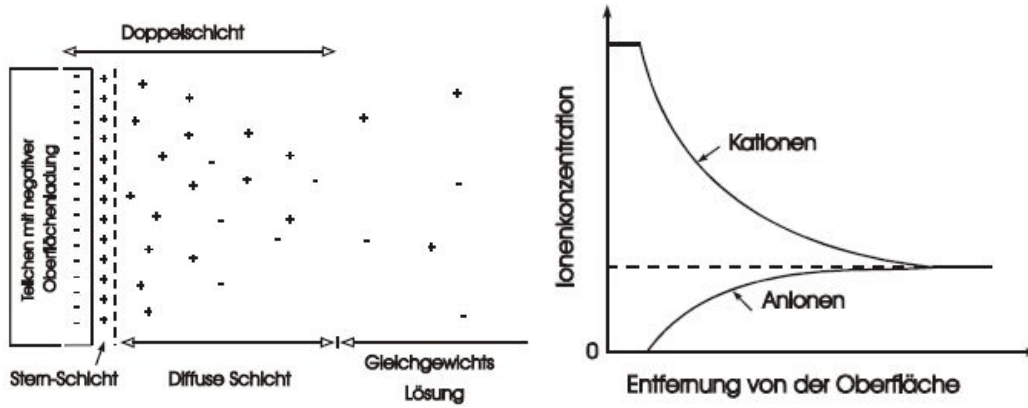


Abbildung 3.1: Die elektrische Doppelschicht (EDL). **Links:** Die Ionenverteilung an der Grenze von Teilchen mit negativer Oberflächenladung zum Elektrolyt. **Rechts:** Der Konzentrationsverlauf von Anionen und Kationen, nach *Radic* (2008b).

Damit ist die imaginäre Leitfähigkeit nur abhängig von der Grenzflächenleitfähigkeit, während die reale Leitfähigkeit sowohl von der elektrolytischen als auch von der Grenzflächenleitfähigkeit bestimmt wird.

Die Sättigungsabhängigkeiten der Leitfähigkeit können empirisch ermittelt und beschrieben werden durch (*Kruschwitz* (2007)):

$$\sigma_G(S) = \sigma_f S^n + \sigma_Q S^v \quad (3.12)$$

mit den materialabhängigen Sättigungsexponenten n (Realteil) und v (Imaginärteil).

3.2 Spektrale Induzierte Polarisation (SIP)

3.2.1 Definition

Bei der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) wird sowohl die frequenzabhängige Übertragungsfunktion $Z(\omega_i)$ als auch die Phasenverschiebung $\varphi(\omega_i)$ zwischen dem Wechselstromsignal und dem gemessenen Spannungssignals aufgezeichnet (Abb. 3.2). Der Frequenzbereich liegt für gewöhnlich zwischen 1 mHz und 1 kHz. Es gilt:

$$Z(\omega_i) = \frac{U(\omega_i)}{I(\omega_i)} \quad \text{und} \quad \varphi(\omega_i) = \varphi_U(\omega_i) - \varphi_I(\omega_i) . \quad (3.13)$$

Die Übertragungsfunktion $Z(\omega_i)$ und die Phasenverschiebung stehen in folgendem Verhältnis zum Real- und Imaginärteil der Impedanz:

$$Z^*(\omega) = |Z(\omega)| e^{i\varphi(\omega)} = Z' + iZ'' , \quad (3.14)$$

sowie

$$|Z(\omega)| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad \text{und} \quad \varphi = \arctan \left[\frac{Z''}{Z'} \right] , \quad (3.15)$$

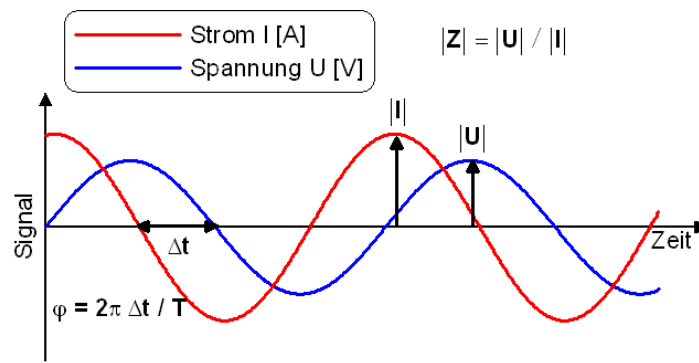


Abbildung 3.2: Zeitverlauf des eingespeisten Wechselstromsignals und des gemessenen Spannungssignals. Der spezifische Widerstand berechnet sich aus dem Verhältniss der beiden Signale multipliziert mit dem jeweils geltenden Geometriefaktor. Die Phasenverschiebung ergibt sich aus der zeitlichen Differenz beider Signale.

mit Z' als Realteil und Z'' als Imaginärteil. Bei den Messungen spiegelt dabei der Realteil die Ohmsche Leitfähigkeit und der Imaginärteil die wesentlich kleinere Polarisation wider. Wie bei den Gleichstrommessungen wird auch bei SIP-Messungen in einer 4-Punkt-Auslage gemessen. Die Geometrie der Auslage spielt eine wesentliche Rolle und muss berücksichtigt werden. Die Berechnung des spezifischen elektrischen Widerstands ρ folgt dann nach

$$\rho(\omega) = Z(\omega)K \quad (3.16)$$

mit K als Geometrie- bzw. Konfigurationsfaktor [m].

3.2.2 Anwendung

Hauptziel der Anwendung von geophysikalischen Methoden ist die Charakterisierung des Untergrunds. Durch Untersuchungen von physikalischen Parametern wie z. B. dem elektrischen Widerstand oder der Geschwindigkeit akustischer Wellen, können Rückschlüsse auf die Gesteins- bzw. Materialeigenschaften gezogen werden.

Die Induzierte Polarisation wurde erstmals 1920 von den Brüdern Schlumberger erwähnt, rief aber erst in den 1950er Jahren das Interesse der Erzerkundung hervor (*Pelton et al.* (1978)). Im Gegensatz zur Gleichstromgeoelektrik konnte mit Hilfe der Induzierten Polarisation zwischen guten elektrolytischen (salinare oder kontaminierte Wässer) und guten metallischen Leitern (Mineralisation) unterschieden werden (*Kretschmar* (2001)). Gerade in Gebieten mit ähnlichen geoelektrischen Leitfähigkeiten konnte z. B. die Vererzung des Untergrunds mittels IP nachgewiesen werden.

Durch die Erweiterung zur Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) in den 1970er Jahren konnte aufgrund des Frequenzverhaltens der Leitfähigkeit auf Transporteigenschaften, Korngrößen, Korngrößenverteilung sowie auf die Porenradienverteilung geschlossen werden (*Börner et al.* (1996), *Weller und Börner* (1996)).

Der Betrag oder der Realteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit steht dabei in engem Zusammenhang mit der Porosität und dem Wassergehalt der untersuchten Stoffe. Der Imaginärteil, der durch die Grenzflächenpolarisation von Fluid und Matrix vornehmlich beeinflusst wird, hängt dagegen maßgeblich von der Größe der inneren Ober-

fläche ab und korreliert des Weiteren mit der Lithologie (*Kemna et al.* (2004)).

Die Methode der Induzierten Polarisation eignet sich aber nicht nur zur Exploration von Erzen sondern wird häufig auch zur Detektion verdeckter Altablagerungen eingesetzt. Gerade auf Kontamination und Milieuänderungen reagiert die Polarisation sehr empfindlich (*Olhoeft* (1985)), wodurch sie besonders zur Untersuchung der Dichtigkeit von Deponien geeignet ist. Die Bestimmung hydraulischer Kennwerte kann ebenfalls möglich sein (*Börner et al.* (1996)).

Neben den klassischen geophysikalischen Anwendungen wird das SIP-Verfahren auch für archäologische Erkundungen eingesetzt. So konnten anhand von Labor- und Feldmessungen Holzplanken in einem Moor detektieren werden. Dabei wurde gezeigt, dass Holz polarisierbar ist und sich das SIP-Verfahren in der archäologischen Prospektion in Zukunft etablieren könnte (*Schleifer* (2002)).

3.2.3 Messungen

Labora Aufbau

Zur Messung des frequenzabhängigen, komplexen Widerstands wurde die Apparatur SIP256C der Firma Radic Research verwendet (*Radic* (2004a)). In Abbildung 3.3 links ist ein Foto des Messaufbaus im Labor zu sehen. Dabei fließt der Strom ausgehend von der computergesteuerten Base Unit (BU, gelber Koffer) in Reihe über einen definierten Widerstand (Shunt) und die Probe. Über den Shunt wird mit Hilfe einer Remote Reference Unit (RRU, orange Kabeltrommel) der Strom gemessen. Über der Probe wird mit Hilfe der zweiten RRU die Spannung gemessen (siehe schematische Darstellung in Abbildung 3.4). Die Berechnung des frequenzabhängigen spezifischen Widerstands $\rho(f_i)$ geschieht nach

$$\rho(f_i) = KR \frac{U_2(f_i)}{U_1(f_i)} \quad (3.17)$$

mit

$U_2(f_i)$: gemessene Spannung an der 2. RRU,

$U_1(f_i)$: Spannungsabfall am Strom-Shunt,

K : Geometriefaktor,

R : Widerstandswert des Strom-Shunts und

f_i : i-te Messfrequenz.

Der Frequenzbereich der SIP256C liegt zwischen 1 mHz und 1 kHz. Die Frequenzen sind auf 38 μ Hz genau einstellbar und für die aufgenommenen Messungen logarithmisch eingeteilt. Über den gesamten Frequenzbereich wird bei 21 Frequenzen gemessen.

Für jede Frequenz wurden mindestens vier Partitionen (Zerlegung der Zeitreihe in Teilzeitreihen) gemessen, um Ausgleichsrechnungen durchzuführen. Zudem wurden die Messwerte einer Frequenz zum Teil gestapelt (Stacks). Die Messzeit einer Probe beträgt über den gesamten Frequenzbereich ca. 150 Minuten (*Radic* (2004a)).

Da die Temperatur während der Messung eine wichtige Rolle spielt, fanden die Messungen in einem auf 20°C temperierten Klimaschrank statt.

Die Laborproben wurden in einer speziell konstruierten Messzelle (Abbildung 3.3, rechts) eingebaut. Darin wird der Strom an den Kopfen über Stirnelektroden aus Edelstahl eingespeist und die Spannung durch zwei Neusilber-Ringelektroden über der

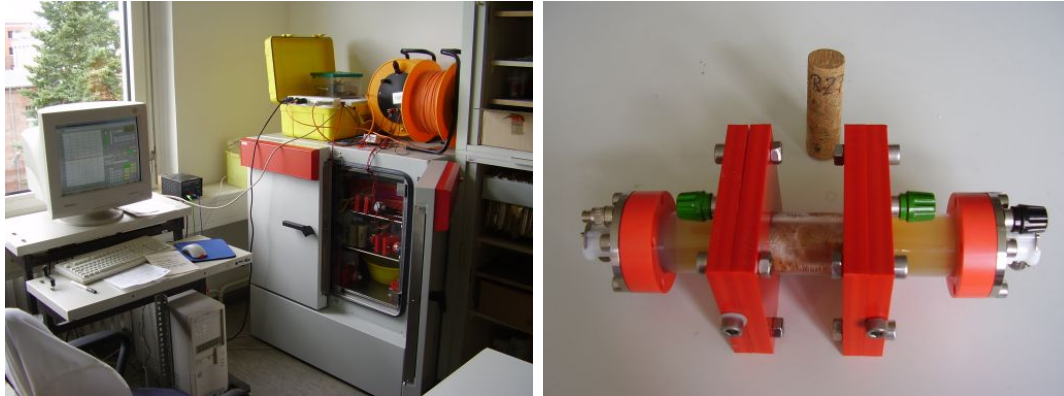


Abbildung 3.3: Links: Abbildung des Laboraufbaus mit der Apparatur SIP 256C. Rechts: BAM Messzelle. Dabei wird der Strom an den Stirnseiten der Messzelle eingespeist, während die Spannung direkt über der Probe abgegriffen wird.

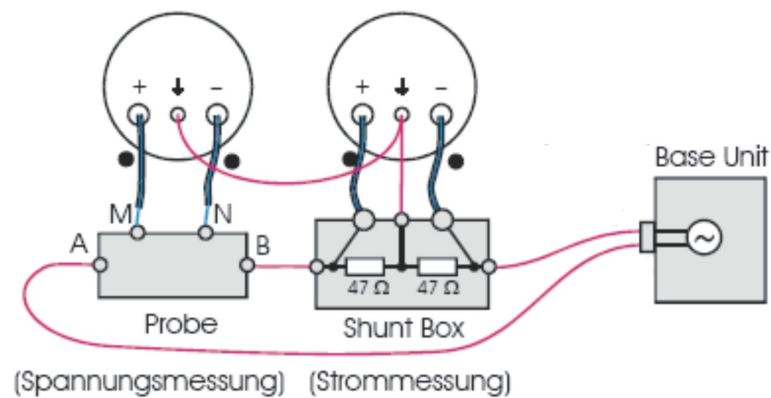


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Messaufbaus einer Labormessung. Eine Reference Remote Unit (RRU) misst über einen definierten Shunt den Strom. Die zweite RRU misst die Spannung über der Probe. Nach Radic (2004a).

Probe abgegriffen.

Die zylindrischen Proben müssen einen Durchmesser von 20 mm und mindestens 50 mm Länge haben und sich mittig in der Messzelle befinden. Als Ankopplungsmittel wurde nach mehreren Versuchen eine 1 %-ige Agar-Agar-Lösung gewählt. Wie destilliertes und Leitungswasser hat die Lösung kaum eigene Phaseneffekte (siehe Abbildung 3.5). Dazu kommt der Vorteil, dass teilgesättigte Proben aus der geleeartigen Agar-Agar-Lösung nur geringfügig Wasser innerhalb der Messdauer aufnehmen.

Neben der hauptsächlich verwendeten Apparatur SIP256C wurden zeitweise weitere Labor-SIP-Apparaturen verwendet (SIP Fuchs, SIP Compact (*Radic* (2008a))). Sie arbeiten nach demselben Prinzip.

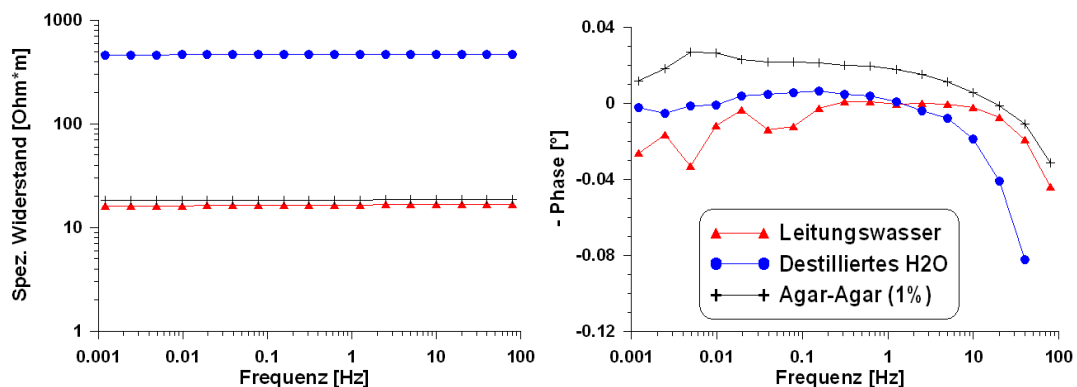


Abbildung 3.5: Links: Spezifischer Widerstand einer mit Leitungswasser, destilliertem Wasser und mit 1 %-iger Agar-Agar-Lösung gefüllten Messzelle. Rechts: Zugehörige Phasendarstellung. Alle drei Ankopplungsmittel weisen erst bei höheren Frequenzen Eigeneffekte auf.

Feldaufbau

Für die Feldmessungen wurde ebenfalls die Apparatur SIP256C verwendet. Dazu werden 24 Remote Units (RU1-24) in Reihe miteinander verkabelt (siehe Abb. 3.6). Für die Feldmessungen war zum Teil die interne Stromquelle von 50 W nicht ausreichend, so dass mit einer externen 250 V Stromquelle gearbeitet wurde.

Die Kabellänge zwischen den RUs und somit der maximale Messabstand zwischen zwei Elektroden ist 10 m wobei die Kabel auf 1 m gekürzt werden können. Jede RU kann über Kupferleitungen sowohl Strom einspeisen als auch Spannung messen. Interne Mikroprozessoren geben die Daten über Glasfaser an die Base Unit weiter. Des Weiteren verfügt jede RU über einen Anschluss für die Strom-/Spannungsmessung als auch über einen zweiten Anschluss für eine unpolarisierbare Elektrode zur Spannungsmessung. Für die erste RU (1) wurde der zweite Anschluss modifiziert, so dass auch dort eine Stromeinspeisung möglich ist. Dies ist wichtig für geschlossene Ringanordnungen. Während für linienförmige Auslagen keine Verbindung zwischen letzter und erster Elektrode nötig ist, fehlen bei den Baumtomographien sonst sämtliche Daten für die Verbindung der letzten RU (24) zur ersten RU (1).

Als Elektroden wurden in den meisten Fällen handelsübliche Stahlnägel verwendet. Sie werden durch die Rinde bis in den ersten Jahrring (festes Holz) geschlagen, so

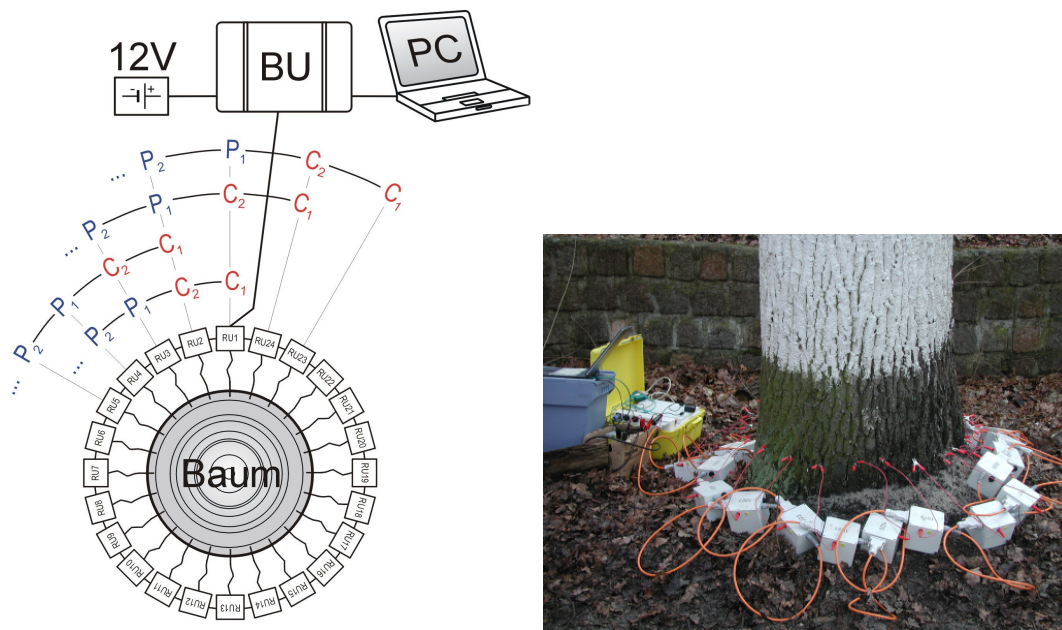


Abbildung 3.6: Links: Skizze des Messaufbaus im Feld. BU - Base Unit, RU1 - RU24 - Remote Units, C - Stromelektroden, P - Spannungselektroden. **Rechts:** Einsatz des Feldmesssystems an einer Eiche. Die Ankopplung erfolgt über Nägel die durch Klemmen mit den in Reihe geschlossenen Remote Units (RUs) verbunden sind.

dass eine gute Ankopplung gewährleistet ist (vgl. dazu Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Die Datenausgabe erfolgt für die Labor- und Feldmessungen in einer ASCII-Datei, in der u. a. der spezifische Widerstand [Ωm], die Phasenverschiebung [$^\circ$], die jeweiligen Fehler, die Elektrodenposition, der Geometriefaktor K sowie Stromstärke, Datum und Uhrzeit abgelegt sind.

Zusätzlich wurde für jede Baummessung die Geometrie der Messebene aufgenommen. Dies wurde mit dem Gerät Calliper (*argus electronic* (2005)) realisiert. Über Triangulation werden damit die x-y-Koordinaten für jede Elektrode berechnet. Diese sind wichtig für eine genaue Inversion und werden nachträglich in die Messdatei geschrieben.

3.2.4 Auswertesoftware

Für die Auswertung der Daten wurden die Messwerte ohne Geometriefaktoren exportiert. In der Ergebnisdatei sind sowohl die genauen Koordinaten der Elektroden als auch der Widerstand R [Ω] und die Phase φ [$^\circ$] zusammen mit ihren prozentualen (R) und absoluten (φ) Fehlern aufgelistet. Nach Plausibilitätsprüfung der Daten und eventueller Eliminierung von Hand, wurden sie mit dem Programm DC2DTree (*Günther und Rücker* (2005)) invertiert.

Ein erstes Abbild der Daten (Pseudosektion) stellt das Programm für einen Kreis mit analytisch berechneten Geometriefaktoren dar. Im Verlauf der Rekonstruktion der Daten werden aus den Elektrodenkoordinaten numerisch die echten Geometriefaktoren berechnet. Ausgehend von einem Startmodell, das in Elemente gleichen Widerstands unterteilt ist und dem physikalischen Auflösungsvermögen entsprechen sollte, wird dann

iterativ dieses gewählte Modell an die Messdaten angepasst (Tomographische Rekonstruktion, *Just* (2002)).

Für eine effiziente Vorwärtsrechnung wurde die Dreigittertechnik entwickelt (*Günther et al.* (2006)). Dabei definiert ein relativ grobes Gitter die Zellen, deren Widerstand zu bestimmen ist. Die Vorwärtsrechnung wird jedoch auf einem global verfeinertem Sekundärfeldgitter durchgeführt. Das lokal, stark verfeinerte Primärfeldgitter wird nur einmal zu Beginn der Inversion für die Vorwärtsmodellierung verwendet.

Die Inversion selbst beruht auf einer Minimierung der Quadratsummen der Abweichung der Daten von der Modellantwort \mathbf{f} , gewichtet mit ihren Fehlern ϵ

$$\Phi_d(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - f_i(\mathbf{m})}{\epsilon_i} \right|^2 = \|\mathbf{D}(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))\|_2^2 \rightarrow \min, \quad (3.18)$$

mit dem Datenvektor \mathbf{d} , der die Logarithmen der scheinbaren spezifischen Widerstände enthält $d_i = \log \rho_i^a$. ϵ_i sind die Fehler der Datenpunkte. \mathbf{m} ist der Vektor des Modells. Für ihn gilt $m_j = \log \rho_j$, wobei ρ_j die jeweiligen Modellwiderstände beschreibt. Einfach ausgedrückt wird versucht, die Differenz zwischen den synthetischen Modelldaten und den realen Daten zu minimieren.

Damit fehlerhafte Daten keinen zu großen Einfluss auf das Ergebnis haben und damit eine vernünftige Anpassung verhindern wird, kann die Wichtung der Daten verändert werden. Dabei werden jenen Daten, die nicht angepasst werden können, höhere Fehler zugewiesen, so dass ihr Einfluss in den nachfolgenden Inversionsschritten sinkt (robuste Inversion). Ein möglicher Nachteil kann dabei die Unterschätzung echter Anomalien sein.

Die Qualität der Lösung kann durch einen Anpassungsfehler erfasst werden. Das Programm gibt einen sogenannten RRMS-Fehler (relative root mean square) aus. Er wird in [%] angegeben und berechnet sich nach

$$\text{RRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - f_i(\mathbf{m})}{d_i} \right)^2}. \quad (3.19)$$

Alternativ wird ein χ^2 -Wert angegeben, bei dem durch die Fehler der Datenpunkte ϵ_i dividiert wird

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - f_i(\mathbf{m})}{\epsilon_i} \right)^2. \quad (3.20)$$

Bei einer guten Fehlerschätzung liegt dieser einheitslose χ^2 -Wert um 1.

Die Anzahl der Iterationsschritte richtet sich nach dem χ^2 -Wert. Wird er nicht stark genug verbessert oder unterschreitet er den Wert 1 wird die Inversion beendet.

DC2dTree wurde ursprünglich entwickelt um die spezifischen Widerstände bei Gleichstrommessungen zu berechnen. Mit der Erweiterung zu SIP-Messungen werden zusätzlich die Phasen mitberechnet. Dazu werden zu Beginn die Widerstandsdaten invertiert. Anschließend wird eine Berechnung der Phasen durchgeführt, bei der dieselben Gleichungssysteme gelöst werden wie für die Widerstandsrechnung (vgl. *Günther et al.* (2006)). Dies geschieht linear und für jede Frequenz einzeln. Für die Fehlerberechnung werden die Fehler der zugehörigen Widerstandsdaten genutzt.

Bei der Berechnung im Inversionsprogramm wird immer von einem zweidimensionalen, in der Länge unendlich ausgedehnten Körper ausgegangen. Dies ist bei Baummessungen im Wurzelbereich nicht gegeben. So kann der nah an der Messebene sich befindende Erdboden einen großen Einfluss auf die Tomographiedaten haben. Eine entscheidende Rolle spielt dabei das Verhältnis von Länge des Probekörpers (bzw. der Entfernung der Messebene vom Erdboden) zum Radius (vgl. dazu Kapitel 4.4). Je größer dieses Verhältnis, also je kleiner der Radius gegenüber der Länge ist, umso kleiner ist der Einfluss der Dreidimensionalität. Idealerweise sollte dieser Effekt in der Inversion durch eine 3D-Rechnung berücksichtigt werden, da sonst eine genaue Interpretation der Ergebnisse schwierig ist. Dies ist bisher jedoch noch nicht möglich.

Eine weitere, noch nicht im Inversionsprogramm berücksichtigte Eigenschaft ist die Anisotropie des Holzes. Versuche haben gezeigt, dass sich der Strom im Holz nicht in alle Richtungen gleich ausbreitet (vgl. dazu Kapitel 5.1). Korrekterweise müsste dies bei der Rückrechnung der Messdaten berücksichtigt werden. Allerdings gibt es dazu noch nicht genügend gesicherte Untersuchungen, zumal die Anisotropie nicht für alle Baumarten gleich ist.

Trotz der oben genannten Einschränkungen war das Programm DC2dTree zum Zeitpunkt dieser Arbeit das einzig bekannte Inversionsprogramm, das für irreguläre zylindrische Geometrien sowohl die Amplituden als auch die Phasen auswerten konnte. Die zum großen Teil nötigen Änderungen im Programm wurden von den Softwareentwicklern (Dr. Th. Günther/ LIAG Hannover und C. Rücker/ Uni Leipzig) nicht-kommerziell und zeitlich kurzfristig durchgeführt. Ohne diese Mitarbeit wären SIP-Ergebnisse von Bäumen zu dieser Zeit noch nicht möglich gewesen.

4 Voruntersuchungen am zylindrischen Probekörper

Tomographiemessungen werden durch eine Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst. Um diese zu erfassen und ihren Einfluss abzuschätzen und damit eine Grundlage zur Interpretation der Messergebnisse zu erhalten, wurden Untersuchungen zu baumtomographischen Messungen an einem zylindrischen Probekörper durchgeführt.

Die Messgenauigkeit der Feldapparatur ist zunächst an einem Testnetzwerk überprüft worden und im Anhang dargestellt (Abbildung A.1). Auf die Elektrodenart und das Elektrodenmaterial wurde ebenfalls eingegangen. Weiterhin sind an einem länglichen, zylindrischen Probekörper verschiedene Messkonfigurationen getestet worden. Dabei ist eine Abschätzung der Messgüte und der Auflösung möglich. Anschließend fanden Versuche zur Erfassung und Berücksichtigung des 3D-Effektes statt.

Die am Ende dieses Kapitels aufgeführten Erkenntnisse dienen dann einer Abschätzung der Einflüsse auf die tomographischen Messungen für die im Feld gemessenen Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung.

4.1 Zylindrischer Probekörper

Um vor Messungen an Bäumen die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens und des Inversionsprogramms zu untersuchen, wurde ein zylindrischer Probekörper hergestellt (Abb. 4.1 links). Das unten geschlossene und oben offene Plastikrohr hat einen Durchmesser von etwa 0,30 m und eine Höhe von etwa 0,70 m. In den Höhen 0,30 m, 0,35 m und 0,40 m wurden jeweils 24 Elektroden in äquidistantem Abstand ($a \sim 0,04$ m) in einer Ebene angebracht. Die obere und untere Elektrodenebene besteht aus gewöhnlichen Stahlelektroden, während die mittlere Elektrodenebene mit goldbeschichteten Elektroden bestückt ist.

Rechts in Abbildung 4.1 sind sowohl für die obere Messebene mit Stahlelektroden als auch für die Messebene mit Goldelektroden die Übergangswiderstände dargestellt. Dabei ist der Mittelwert der Übergangswiderstände für die Stahlebene mit $82 \text{ k}\Omega$ wesentlich geringer als für die Goldebene ($620 \text{ k}\Omega$).

Das Rohr war, je nach Versuch, mit Leitungswasser oder Wasser einer bestimmten Salinität gefüllt. Für die Untersuchung des 3D-Effektes wurde zusätzlich die Wasserhöhe variiert. Des Weiteren konnten verschiedene Materialien in den mit Wasser gefüllten Probekörper (Rohre, Balken, Pylone) gestellt werden.

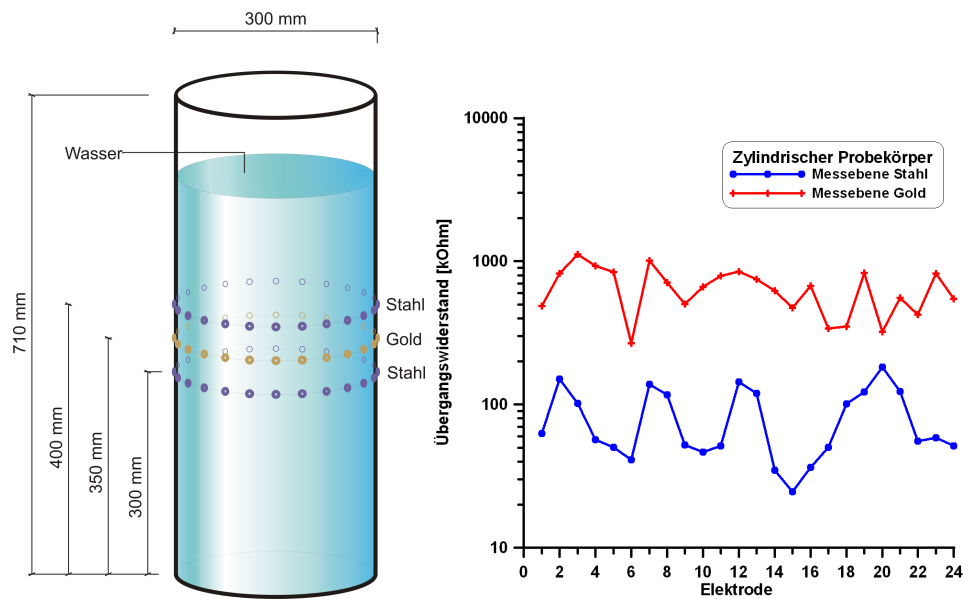


Abbildung 4.1: Schematische Zeichnung des zylindrischen Probekörpers. In dem nach unten abgedichteten und nach oben offenen Rohr wurden drei Elektroden Ebenen angebracht. Die äußeren beiden bestanden aus herkömmlichen Stahlelektroden, die mittlere Ebene aus Goldelektroden. Das Rohr war für die Versuche mit Wasser gefüllt.

4.2 Elektroden

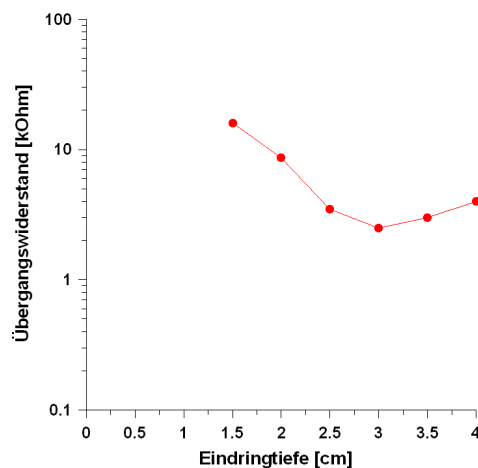
4.2.1 Elektrodenart

Material und Einschlagtiefe der Elektroden haben neben vielen anderen Faktoren einen Einfluss auf das Messergebnis. Schon 1936 hat sich *Nusser* (1936) mit dem Einfluss der Elektrodengröße bei der Messung des elektrischen Widerstands an Holz beschäftigt. Die in seiner Arbeit verwendeten kreisförmigen, starren Plattenelektroden hatten demnach nur einen sehr geringen Einfluss auf das Messergebnis.

Für die Messungen an einem stehenden Baum mit tiefer Rinde (bei Eiche bis ca. 5 cm) empfehlen sich allerdings keine Plattenelektroden sondern spitze Nadelelektroden, die durch die Rinde bis in den Holzkörper (in den ersten Jahrring) eindringen können.

Zur Erfassung der Ankopplung am lebenden Baum sind dazu eigene Versuche durchgeführt worden. Stahlnägel mit ca. 5 cm Länge und 0,2 cm Durchmesser wurden als Elektroden verwendet. Diese wurden in variablen Abstand in den Baum getrieben und dabei der Übergangswiderstand gemessen. In Abbildung 4.2 sind die Übergangswiderstände an einer Eiche (*Quercus robur*) zu sehen. Dabei wurden die niedrigsten Widerstände bei einer Tiefe von ca. 3 cm erreicht. In dieser Tiefe wurden die Rinde und das Kambium durchschlagen und der Stahlnagel steckte i. d. R. im ersten Jahrring.

Allgemein wurde festgestellt, dass die Übergangswiderstände bei einer Messung in der Wachstumsperiode der Bäume um 1 - 5 k Ω liegen. Damit sind die Übergangswiderstände am lebenden Baum wesentlich geringer als die Übergangswiderständen am künstlichen Probekörper.

**Abbildung 4.2:**

Übergangswiderstände an einer Eiche (*Quercus robur*) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Nägel. Die niedrigsten Übergangswiderstände wurden bei einer Eindringtiefe von 3 cm erreicht.

4.2.2 Elektrodenmaterial

Aussagen über die Eignung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien für geoelektrische Messungen wurden schon vielfach veröffentlicht. So kommen sowohl *Schleifer und Junge* (2004) als auch *LaBrecque und Daily* (2008) zu dem Ergebnis, dass zwar unpolarisierbare Potentialelektroden für Widerstandsmessungen am besten geeignet sind, jedoch herkömmliche Stahlelektroden in den meisten Fällen ausreichend gute Ergebnisse liefern.

Du (1991), der sich mit dem Elektrodenmaterial für elektrische Messungen an Holz beschäftigt hat, schreibt gleichfalls, dass es bei seinen Untersuchungen keine signifikanten Einflüsse auf den Widerstand gab (bei einer Messdauer unter 10 min).

Eigene Versuche an dem zylindrischen Probekörper zeigen ebenfalls nur geringe Unterschiede zwischen Stahl- und Goldelektroden. Da Goldelektroden im Allgemeinen nicht so stark polarisierbar sind wie Stahlelektroden, sollten sie geringere Phaseneffekte zeigen. Diese konnten jedoch nicht nachgewiesen werden.

In Abbildung 4.3 ist die Verteilung von scheinbarem Widerstand und Phase für drei verschiedene Stromdipole einer Tomographiemessung dargestellt. Bei allen ist die gute Übereinstimmung hinsichtlich des scheinbaren Widerstands offensichtlich. In der Phasenverteilung bringen die Goldelektroden jedoch keine signifikanten Verbesserungen (Tabelle 4.1) gegenüber den herkömmlichen Stahlelektroden.

Deshalb wurde im weiteren Verlauf der Messungen mit herkömmlichen Stahlelektroden gearbeitet.

Anordnung (Stromdipol)	1 - 2	10 - 11	18 - 19	Gesamt
Gold	0,23°	0,13°	0,09°	0,113°
Stahl	0,13°	0,05°	0,05°	0,07°

Tabelle 4.1: Durchschnittliche Abweichung der Stahl- und Goldelektroden von 0° für ausgewählte Stromdipole und für die gesamten Stromdipole einer Messung.

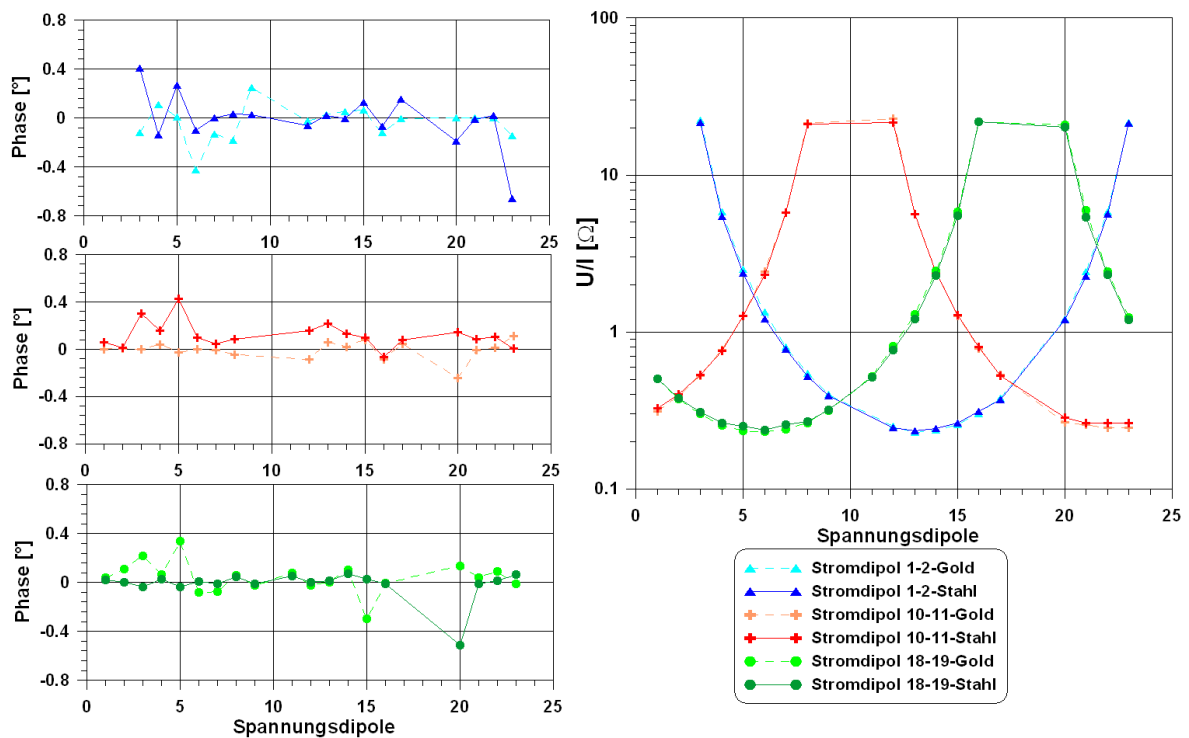


Abbildung 4.3: Vergleich zwischen Stahl- und Goldelektroden. Während beim scheinbaren Widerstand die Werte sowohl für die Stahl- als auch für die Goldelektroden sehr gut übereinstimmen (rechts), ist in der Phasenverteilung (links) keine signifikante Verbesserung der Goldelektroden gegenüber den Stahlelektroden erkennbar.

4.3 Messkonfiguration

4.3.1 Dipol-Dipol

Die meist genutzte Konfiguration für IP-Messungen ist die Dipol-Dipol-Konfiguration (*Edwards (1977), Chambers et al. (2004)*). Sie bietet den Vorteil einer guten Auflösung, ist aber dafür anfälliger für das Rauschen bei größeren Dipolabständen (geringes Signal-Rausch-Verhältnis, *Dahlin und Zhou (2004)*).

In mehreren Artikeln zu elektrischen Tomographiemessungen an Holz wurde die Dipol-Dipol-Konfiguration genutzt (*Just (2002), Hanskötter (2003), Just et al. (2005)*). In synthetischen Modellrechnungen hat *al Hagrey (2006)* gezeigt, dass die Auflösung von Anomalien im Stamm bei der Dipol-Dipol-Konfiguration besser ist als für die Wenner-Konfiguration.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde ebenfalls mit der Dipol-Dipol-Konfiguration gearbeitet. Mit der Messapparatur SIP256C werden für jeden Stromdipol alle Spannungsdipole gleichzeitig gemessen. Dadurch ergibt sich eine große Datendichte. Neben den einfachen Stromdipolen wurde i. d. R. zusätzlich mit doppelter und vierfacher Dipollänge gemessen, so dass für eine vollständige Tomographiemessung bei 24 Elektroden 630 Einzelmessungen durchgeführt werden.

Reziprozität

Die Dipol-Dipol-Konfiguration ist symmetrisch, so dass bei einer Messung sowohl normale (Spannungsdipole hinter dem Stromdipol) als auch reziproke (Spannungsdipole vor dem Stromdipol) Messwerte auftreten (siehe Abb. 4.4). Dies kann zur Qualitätssicherung der Messung dienen, da im Idealfall die Messwerte der normalen und reziproken Anordnungen gleich sein sollten.

Um dies zu überprüfen, wurde eine Messung am künstlichen Probekörper durchgeführt. Aus dem kompletten Datensatz wurden die normalen und reziproken Daten für $f = 1,25 \text{ Hz}$ verglichen. Dabei war der Probekörper einmal mit Leitungswasser gefüllt, beim zweiten Versuch zusätzlich mit einem zentral eingesetzten Holzbalken und anschließend mit einem dezentralen Plastikrohr.

Für den ersten Stromdipol $C_1 = 1$, $C_2 = 2$ (Stromkanäle an Elektroden 1 und 2) sind die Ergebnisse in Abbildung 4.5 dargestellt. Dabei fällt bei den scheinbaren Widerständen (U/I , ohne Konfigurationsfaktor) die sehr gute Übereinstimmung der normalen und reziproken Amplituden auf, sowohl bei der Wassermessung, als auch bei der Messung mit Holzbalken und Rohr. Die Unterschiede im Widerstand zwischen den Datensätzen sind gering, aber sichtbar. Hier spiegelt sich die unterschiedliche Befüllung des Probekörpers wider.

In der Phasenverteilung stimmen die reziproken und normalen Daten weniger miteinander überein. Während die normalen Daten nur gering um 0° schwanken, sind die reziproken Daten zu negativen Werten hin verschoben. Von der Differenz der reziproken und normalen Daten kann theoretisch auf die Qualität der Messung geschlossen werden. Bei der SIP256C sind die Stromkabel von den Potentialkabeln getrennt. Jedes Potentialkabel ist dabei so kurz wie möglich, d. h. es führt nur von der Elektrode zur zugehörigen Remote Unit (RU), wo der Messwert erfasst und als Datenpaket über Glasfaser an die Base Unit (BU) weitergeleitet wird. Das Stromkabel führt von der Base Unit bis zu den beiden jeweils einspeisenden RUs. Dadurch treten bei den normal ge-

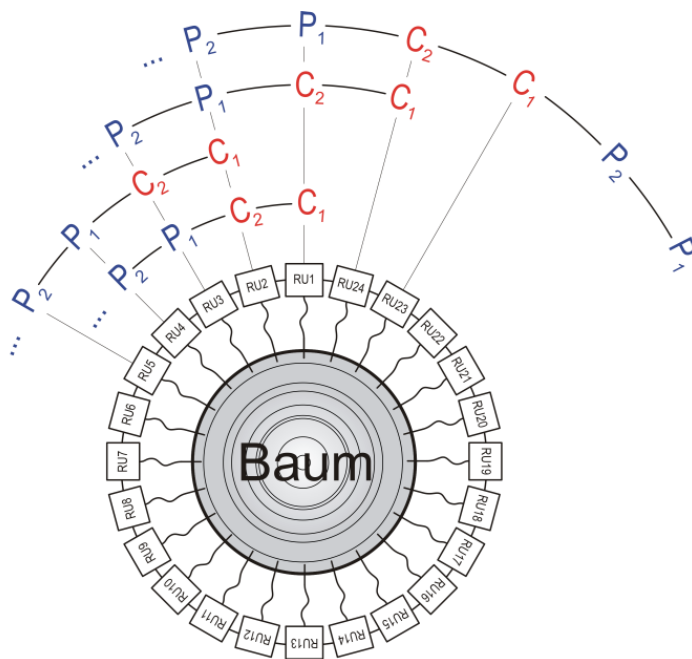


Abbildung 4.4: Schematische Abbildung einer Dipol-Dipol-Messung an einem zylindrischen Körper. Dabei treten sowohl normale (Spannungsdipole hinter dem Stromdipol) als auch reziproke (Spannungsdipole vor dem Stromdipol) Messwerte auf.

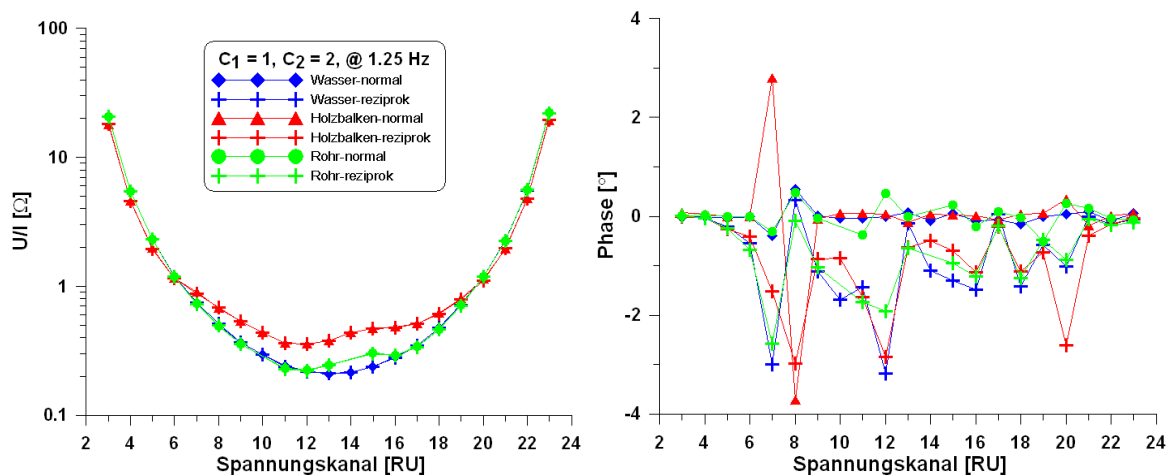


Abbildung 4.5: Vergleich von normalen und reziproken Daten für den ersten Stromdipol $C_1 = 1, C_2 = 2$. Die Unterschiede in den scheinbaren Widerständen sind gering, während in der Phasenverteilung die Daten weniger gut übereinstimmen.

messenen Daten nur geringe elektromagnetische Kopplungseffekte auf (*Radic* (2004b)). Bei allen reziproken Daten sind diese Effekte jedoch größer, da dort das Stromkabel parallel zum Spannungskabel verläuft. Ein Vergleich zwischen normalen Daten und reziproken Daten gibt damit nicht mehr nur Auskunft über die Qualität der Messung, sondern gleichzeitig auch über die Größe des Kabeleffektes.

Bei den hier aufgeführten, eigenen Versuchen wurde damit gezeigt, dass sich in der Phase die reziproken Daten deutlich von den normal gemessenen Daten unterscheiden und damit eine ideale Messung nicht stattfindet. Wie gut die Qualität der Gesamtmessung ist, lässt sich schwer abschätzen, da beide Effekte (Kabeleffekt, Messqualität) bei den tomographischen Messungen vorhanden sind.

Messwertgüte durch Polarisierungseffekte

Um die Messwertgüte durch Polarisierungseffekte abzuschätzen, fanden zeitlich nah beieinander liegende Wiederholungsmessungen statt. Dabei wurden vier Messzyklen an den Stahlelektroden durchgeführt, die im bestimmten zeitlichen Abstand zueinander verliefen. Ziel war, neben der Abschätzung der Messgüte, den Polarisierungseffekt der Elektroden während einer Messung zu beobachten.

Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse einer Messanordnung für den 13. Stromdipol ($C_1 = 13, C_2 = 14$). Jeweils zwei Messungen bilden einen Zyklus. Zwischen den Messzyklen war die Apparatur abgeschaltet.

Im Widerstand (links) ist keine Abhängigkeit von der Zeit zwischen den Messungen zu erkennen. In der Phasenverteilung (rechts) sind geringe Unterschiede zu sehen. Dabei sind die Differenzen in einem Messzyklus (gleiche Farbe, unterschiedliche Symbole), mit Ausnahme vom ersten Messzyklus, gering. Das Abweichen der allerersten Messung (zum Zeitpunkt $t = 0$ min) bei den hinteren Spannungskanälen fällt auf, kann aber mit Relaisproblemen in einer Remote Unit zu Beginn einer Messung erklärt werden.

Allgemein zeigte sich, dass es Unterschiede bei Wiederholungsmessungen gibt, diese

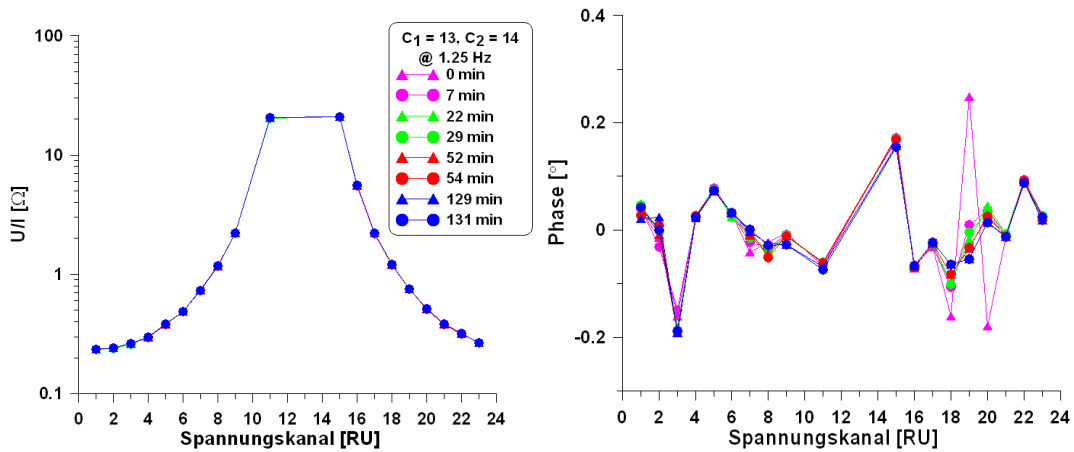


Abbildung 4.6: Scheinbare Widerstands- und Phasenverteilung für den 13. Stromdipol zu unterschiedlichen Messzeiten. Während der Scheinbare Widerstand innerhalb eines Messzyklus konstant bleibt, ändert sich der Phaseneffekt geringfügig.

aber gering ausfallen. Dabei lag der mittlere Phasenfehler der Versuche für $f = 1,25$ Hz bei durchschnittlich $0,007^\circ$

4.3.2 Bipol-Dipol

Eine Dipol-Dipol-Messung mit 24 Elektroden und der Berücksichtigung von einfacher, doppelter und vierfacher Dipollänge dauert für eine spektrale IP-Messung im Frequenzbereich von 10 Hz bis 0,156 Hz über 3 h. Um die (tages-)zeitlichen Änderungen bei den Baummessungen so gering wie möglich zu halten, wurde eine zeitsparende, aber möglichst genauso hochauflösende Bipol-Dipol-Konfiguration (BD) in Analogie zu Gradientenanordnung (*Dahlin und Zhou* (2004)) entwickelt.

Bei dieser Konfiguration sind nur einige ausgewählte Elektroden Stromelektroden, während an allen anderen die Spannung gemessen wird. Im Wesentlichen stehen sich hierbei die Stromelektroden bei vier Messungen 180° gegenüber und bei vier weiteren stehen sie 90° zueinander (Abb. 4.7). Die Spannungen werden über alle möglichen, benachbarten Dipole gemessen. Dabei ergibt sich ein Messdatensatz für eine komplette Tomographiemessung mit 24 Elektroden von 160 Messpunkten. Neben der Zeitersparnis ist die Verbesserung der Datenqualität ein Vorteil, da der Abstand der Spannungsdipole von den Strombipolen geringer ist. Überdies wird durch die gegenüberliegenden Strombipole der Stromfluss durch das Zentrum des Baumes garantiert.

Um eine qualitative Aussage für die Bipol-Dipol-Konfiguration (BD) zu erhalten, wurde eine Messung mit allen möglichen Strombipolen aufgenommen, die sich in 90° und 180° zueinander befinden. Aus diesem kompletten Datensatz wurden siebenmal die für eine komplette BD-Konfiguration nötigen Anordnungen herausgesucht. Diese sieben Fälle befinden sich untereinander in verschiedenen Winkeln zum Probekörper (Tabelle 4.2). Alle Fälle sollten theoretisch die gleichen Ergebnisse liefern.

In Tabelle 4.3 sind die Abweichungen der verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1 (Originalfall) für eine Messung am wassergefüllten Probekörper aufgeführt.

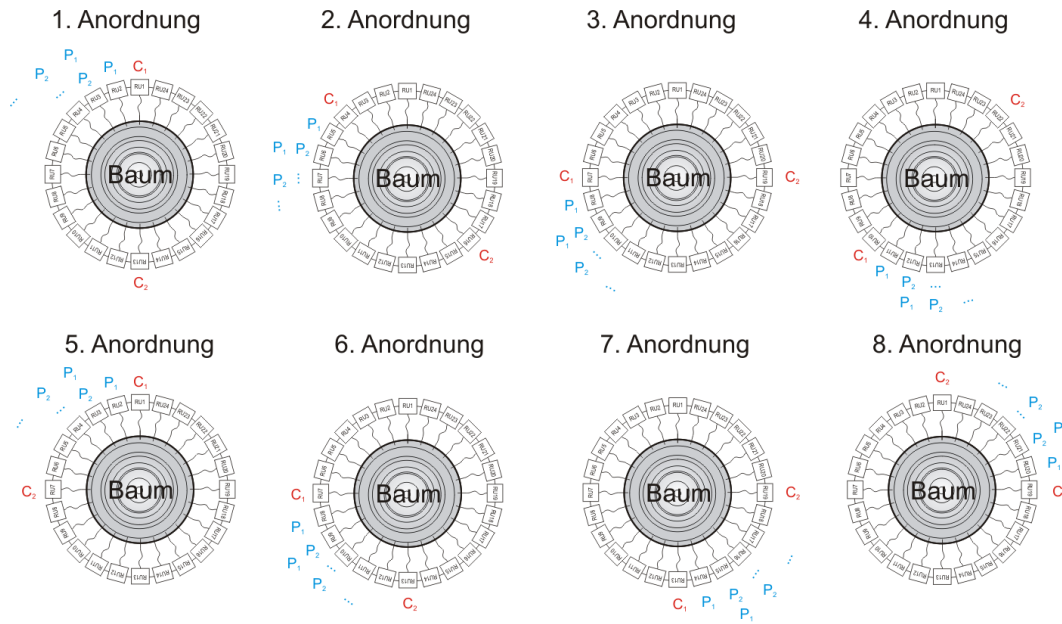


Abbildung 4.7: Bipol-Dipol-Konfiguration mit acht Anordnungen. Dabei stehen sich die Strombipole bei vier Anordnungen 180° gegenüber (Anordnung 1-4) und bei vier weiteren 90° (Anordnung 5-8) zueinander. Alle anderen Elektroden zeichnen als Spannungsdipole auf.

Dabei wurde über alle Daten die mittlere Abweichung des invertierten, spezifischen Widerstands und des Phasenwertes für jedes Dreiecksgitter der Inversion berücksichtigt. In der letzten Zeile ist die prozentuale Abweichung des Inversionswiderstands zu dem spezifischen Widerstand des Leitungswassers (ca. $13,6 \Omega\text{m}$) angeführt. Im Anhang A.2 sind zusätzlich die verschiedenen Tomogramme des spezifischen Widerstands für die unterschiedlichen Fälle dargestellt.

Die mittlere Abweichung der verschiedenen Fälle bezogen auf Fall 1 für den spezifischen Widerstand liegt bei $0,22 \Omega\text{m}$, für die Phase bei $0,17^\circ$. Auf die reale Leitfähigkeit des Wasser im Probekörper bezogen liegen die prozentualen Unterschiede im Durchschnitt bei ca. $1,6\%$.

In Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 sind die Abweichungen des spezifischen Widerstands und der Phase zusammen mit dem Anpassungsfehler der invertierten Daten (RRMS, vgl. Kapitel 3.2.4) zu sehen. Bei den Messungen befand sich zusätzlich ein Holzbalken (Tabelle 4.4) bzw. ein Metallrohr (Tabelle 4.5) im Probekörper.

Alle Inversionsergebnisse des ersten Messversuchs gaben den Holzbalken an der korrekten Stelle wieder. Jedoch ist die Ausrichtung des Balkens nicht in allen Fällen gleich (vgl. Abb. A.2). Der Anpassungsfehler lag im Schnitt bei $7,1\%$, was zum Teil auf eine geringe Messqualität (Elektrodenprobleme) zurückzuführen war. Die Abweichungen gegenüber Fall 1 sind im Mittel für den spezifischen Widerstand $2,76 \Omega\text{m}$ und für die Phase $0,45^\circ$.

Für die Messung mit Metallrohr ergaben sich geringere Messfehler ($2,8\%$) und Abweichungen. Die Inversionsergebnisse des spezifischen Widerstands zeigten eine gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen Lage des Metallrohrs.

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7
Anordnung (C1-C2)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1.	1 - 13	2 - 14	3 - 15	4 - 16	5 - 17	6 - 18	7 - 19
2.	4 - 16	5 - 17	6 - 18	7 - 19	8 - 20	9 - 21	10 - 22
3.	7 - 19	8 - 20	9 - 21	10 - 22	11 - 23	12 - 24	13 - 1
4.	10 - 22	11 - 23	12 - 24	13 - 1	14 - 2	15 - 3	16 - 4
5.	1 - 7	2 - 8	3 - 9	4 - 10	5 - 11	6 - 12	7 - 13
6.	7 - 13	8 - 14	9 - 15	10 - 16	11 - 17	12 - 18	13 - 19
7.	13 - 19	14 - 20	15 - 21	16 - 22	17 - 23	18 - 24	19 - 1
8.	19 - 1	20 - 2	21 - 3	22 - 4	23 - 5	24 - 6	1 - 7

Tabelle 4.2: Bipol-Dipol-Konfiguration unter verschiedenen Winkeln mit Angabe des jeweiligen Stromelektrodenpaars. Die Stromelektroden bei den ersten vier Anordnungen stehen sich 180° gegenüber (1-13, 4-16, ...), bei den letzten vier 90° zueinander (1-7, 7-13, ...)

Abweichung zu Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Ø
ρ [Ωm]	0,19	0,24	0,23	0,23	0,23	0,18	0,22
φ [°]	0,22	0,18	0,22	0,17	0,13	0,11	0,17
σ_{Wasser} [%]	1,39	1,76	1,69	1,69	1,69	1,32	1,59

Tabelle 4.3: Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der Probekörper war mit Leitungswasser gefüllt, welches einen spezifischen Widerstand von 13,6 Ωm aufwies.

Abweichung zu Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Ø
ρ [Ωm]	1,70	4,43	2,77	3,70	2,18	1,80	2,76
φ [°]	0,76	0,54	0,31	0,41	0,37	0,29	0,45
RRMS [%]	8,8	5,3	6,9	5,9	8,0	7,5	7,1

Tabelle 4.4: Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der wassergefüllte Probekörper war zusätzlich mit einem Holzbalken bestückt. Der Anpassungsfehler (RRMS) der invertierten Daten ist aufgrund der geringen Messqualität erhöht.

Abweichung zu Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Ø
ρ [Ωm]	0,22	0,19	0,14	0,21	0,20	0,12	0,18
φ [°]	0,47	0,34	0,43	0,37	0,32	0,29	0,37
RRMS [%]	2,8	3,1	2,6	2,8	2,9	2,7	2,8

Tabelle 4.5: Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der wassergefüllte Probekörper war zusätzlich mit einem Metallrohr bestückt. Der Anpassungsfehler (RRMS) der invertierten Daten ist mit durchschnittlich 2,8% gut.

Zusammenfassend zeigte sich damit, dass Unterschiede bei den einzelnen Fällen vorhanden sind. Diese variieren je nach Versuchsreihe. So waren die Abweichungen beim Versuch mit dem Holzbalken größer als bei dem Wasser oder dem Metallrohr. Dies hat in erster Linie mit den eckigen, unsymmetrischen Abmaßen des Balkens (9,5 x 14,5 x 100 cm (L x B x H), vgl. Kap. 4.5.1) zu tun. Dabei kann die Lage der Stromelektroden in Bezug zur Position des Balkens eine Rolle spielen (siehe Abb. A.2). Für zylindrische Abmaße (Rohr) scheint dies nicht so gravierend zu sein.

Da die in Bäumen vorkommenden Anomalien in der Mehrheit keine klar definierten, eckigen Grenzen haben und der Unterschied zwischen den einzelnen Fällen gering ist, wurde mit der Bipol-Dipol-Konfiguration im weiteren Verlauf mit Fall 1 gearbeitet.

4.3.3 Vergleich mit anderen Konfigurationen

Neben der Bipol-Dipol- (BD) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (DD) wurden auch Untersuchungen mit der Wenner-alpha- (WA) und der Schlumberger-Konfiguration (SL) durchgeführt. Wie in Abbildung 4.8 zu sehen, befinden sich im Unterschied zur Dipol-Dipol-Konfiguration die Spannungselektroden (P_1 , P_2) bei der Wenner- und Schlumberger-Konfiguration zwischen den Stromelektroden (C_1 , C_2). Dabei gibt a den Abstand der (Spannungs-) Dipole voneinander an und L die Gesamtlänge der Auslage. Die Messdauer der vier Konfigurationen sind sehr unterschiedlich (Tabelle 4.6). So erfordert eine komplette Wenner-Tomographiemessung bei einer Messfrequenz von 1,25 Hz ca. 3 h, während die Bipol-Dipol-Konfiguration bei einer ähnlichen Anzahl von Daten (# 160) nur 6 min benötigt.

	Anordnungen [#]	Messdauer [min]	Datenanzahl [#]
Schlumberger (SL)	264	294	264
Wenner-alpha (WA)	168	169	168
Dipol-Dipol (DD)	42	38	630
Bipol-Dipol (BD)	8	6	160

Tabelle 4.6: Vergleich der Anordnungen, Messdauer und Datenanzahl für vier verschiedene Konfigurationen bei einer Messfrequenz von 1,25 Hz (Multikanalapparatur).

Um die konfigurationsabhängigen Unterschiede aufzuzeigen, sind in Abbildung 4.9 die Inversionsergebnisse der spezifischen Widerstände (a-d) für eine Messung ($\rho \sim 13,6 \Omega\text{m}$) am wassergefüllten, zylindrischen Probekörper für die vier verschiedenen Konfigurationen dargestellt ($f = 1,25 \text{ Hz}$). Dabei machen sich die unterschiedlichen Sensitivitäten der Anordnungen bemerkbar. Die höherohmige, zentrale Anomalie in allen Tomogrammen ist in erster Linie auf die Nichtberücksichtigung des 3D-Effekts (siehe Kapitel 4.4) bei der Inversion zurückzuführen. Die Anomalieeffekte am äußeren Rand bei der Wenner-Konfiguration jedoch nicht. Auch in der Schlumberger-Konfiguration ist diese Anomalie noch erkennbar. Die Tomogramme der Dipol-Dipol und Bipol-Dipol-Konfiguration sind dagegen sehr konzentrisch und einander sehr ähnlich.

In Abbildung 4.9 (e-h) sind die Histogramme der Phasenwerte $[\circ]$ zu sehen. Da Leitungswasser in diesem Frequenzbereich unpolarisierbar ist, sollte die Phasen um 0° liegen. Am ehesten ist das bei der Schlumberger-Konfiguration der Fall. Der Mittelwert der Messdaten dieser Konfiguration liegt bei $-0,001^\circ$. Im Gegensatz dazu ist der

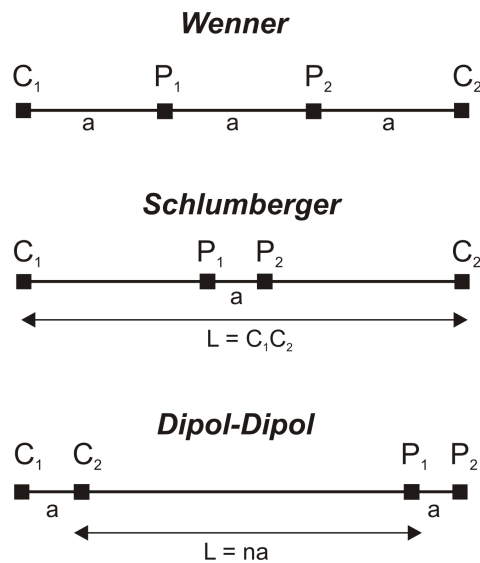


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Wenner- (WA), Schlumberger- (SL) und Dipol-Dipol-Konfiguration (DD). Bei den ersten beiden Konfigurationen befinden sich die Spannungselektroden P_1 , P_2 zwischen den Stromelektroden C_1 , C_2 . Bei der Dipol-Dipol-Konfiguration sind beide Dipole nebeneinander angeordnet. Die Gesamtauslagenlänge L setzt sich entweder zusammen aus dem Abstand der Stromdipole (WA, SL) oder aus dem Vielfachen des Dipolabstandes a .

Phasenmittelwert der Dipol-Dipol-Konfiguration deutlich größer, jedoch mit $-0,021^\circ$ noch gering. Ursache dafür könnte die größere Entfernung zwischen Strom- und Spannungsdipolen bei der DD-Konfiguration sein.

Trotz der breiteren Streuung von Phasenwerten bei der Dipol-Dipol-Konfiguration sind die Wenner- und Schlumberger-Konfigurationen keine Alternative für spektrale IP-Messungen. Der Zeitaufwand dieser Messungen ist einfach zu groß. Des Weiteren kann mit der Dipol-Dipol-Konfiguration eine Vergleichbarkeit zu anderen Autoren gewährleistet werden.

Eine praktikable Option ist hingegen die Bipol-Dipol-Konfiguration. Um die Unterschiede hinsichtlich der Auflösung zwischen der DD- und der BD-Konfiguration herauszuarbeiten, wurde in den weiteren Voruntersuchungen mit diesen Konfigurationen gearbeitet.

4.4 3D-Effekt

Bei der Berechnung des spezifischen Widerstands ρ aus den Messdaten wird über den Konfigurationsfaktor K [m] (K -Faktor) die Geometrie des Probekörpers und der Elektrodenkonfiguration berücksichtigt. Es gilt:

$$\rho = RK . \quad (4.1)$$

Dabei ist $R = \frac{\Delta U}{I}$ mit ΔU als Spannungsdifferenz und I als Strom.

Das Inversionsprogramm DC2dTree (Kap. 3.2.4) berechnet die K -Faktoren numerisch aus den x-y-Koordinaten der Elektroden. Dabei wird bei der hier angewandten zweidimensionalen Betrachtung von einem unendlich ausgedehntem Körper ausgegangen. Dies entspricht bei dem verwendeten Probekörper und auch an Bäumen nicht der Realität. Die Grenzflächen sind beim Probekörper je nach Elektrodenebene 30 - 40 cm von der Messebene entfernt.

Die Berücksichtigung dieser Dreidimensionalität ist momentan bei DC2dTree noch nicht möglich. Daher wurde im folgenden der Einfluss des sogenannten 3D-Effektes genauer

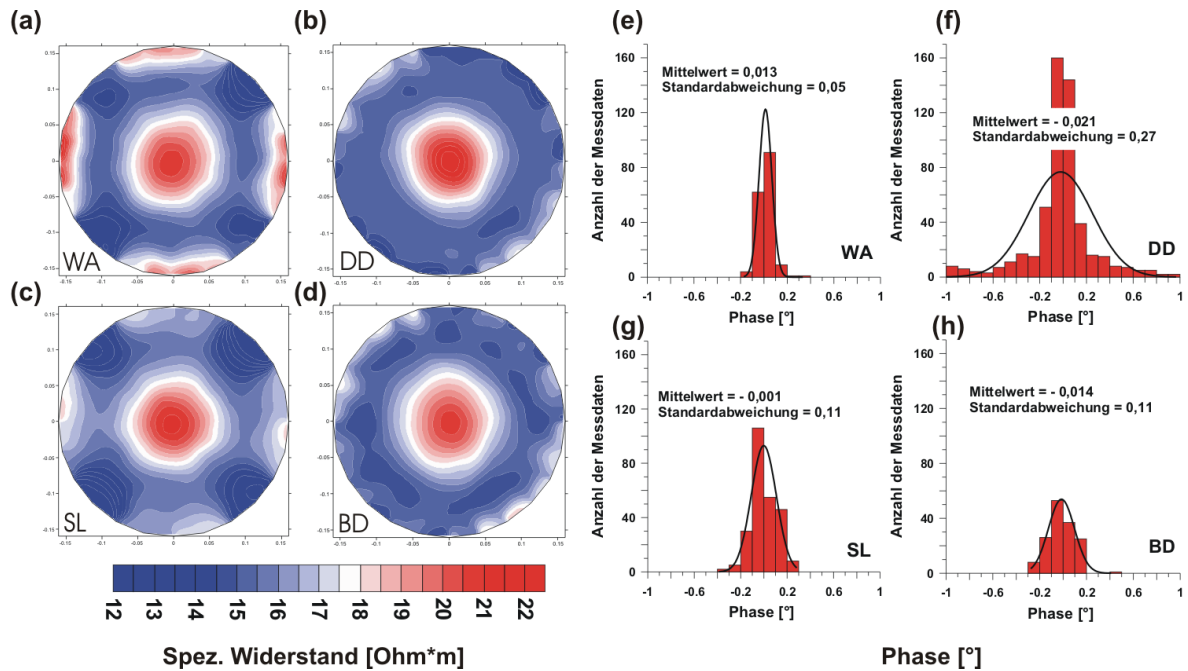


Abbildung 4.9: a-d: Inversionsergebnisse der spezifischen Widerstände für den mit Wasser gefüllten Probekörper für verschiedene Konfigurationen ($f = 1,25$ Hz). Die höherohmige, zentrale Anomalie im Zentrum des Probekörpers ist auf die Vernachlässigung des 3D-Effekts zurückzuführen (vgl. dazu Kap. 4.4). d-h: Histogramme der Phasenmesswerte für dieselbe Messung. Die erwarteten Phasenwerte um 0° sind bei der SL-Konfiguration am besten wiedergegeben.

untersucht, um Abschätzungen hinsichtlich der späteren Interpretation von Baumtomogrammen zu gewinnen.

4.4.1 Konfigurationsfaktor

Zur Ermittlung der realen Konfigurationsfaktoren fand für die Dipol-Dipol- und die Bipol-Dipol-Konfiguration eine Messung am wassergefüllten Probekörper statt. Bei bekannter Leitfähigkeit des Wasser konnte durch Umstellen von Formel 4.1 (mit ρ = spezifischer Widerstand des Wassers und R = Messwert, *Weidelt und Weller* (1997)) für jeden Strom- und Spannungsdipol der K-Faktor experimentell bestimmt werden. In Abbildung 4.10 ist die Abweichung der experimentell bestimmten K-Faktoren von den K-Faktoren des Inversionsprogramms DC2dTree zu sehen; links für einen Strombipol der Bipol-Dipol-Konfiguration und rechts für einen Stromdipol der Dipol-Dipol-Konfiguration.

Bei beiden Konfigurationen zeigt sich, dass die im Programm berechneten K -Faktoren immer über den experimentell bestimmten K -Faktoren liegen. Mit zunehmenden Dipolabstand werden die Abweichungen zwischen den K -Faktoren immer größer. So erklärt sich auch die Widerstandsanomalie im Zentrum des Probekörper bei den Wassermessungen (vgl. Abb. 4.9).

Die zu groß berechneten K -Faktoren im Inversionsprogramm können berücksichtigt

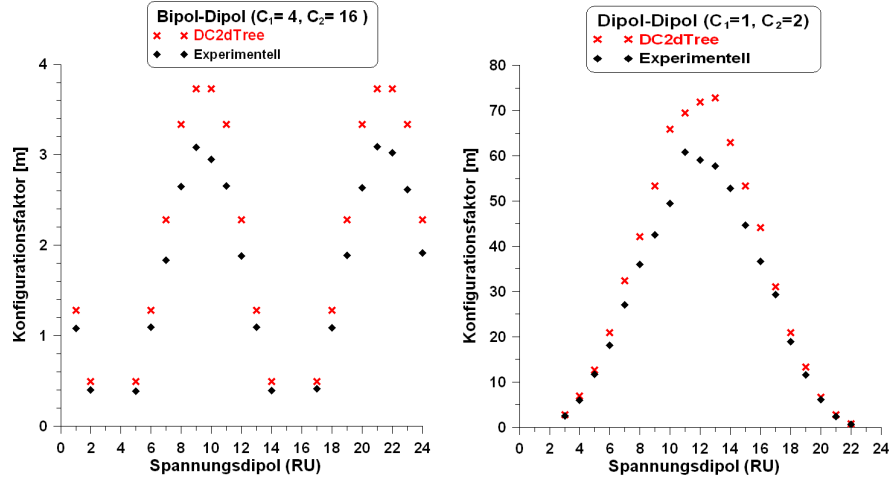


Abbildung 4.10: Abweichungen der experimentell bestimmten K -Faktoren von den im Inversionsprogramm berechneten K -Faktoren. Links für die Bipol-Dipol-Konfiguration mit den Stromeinspeiseelektroden 4 - 16 und rechts für die Dipol-Dipol-Konfiguration mit den Stromeinspeiseelektroden 1 - 2.

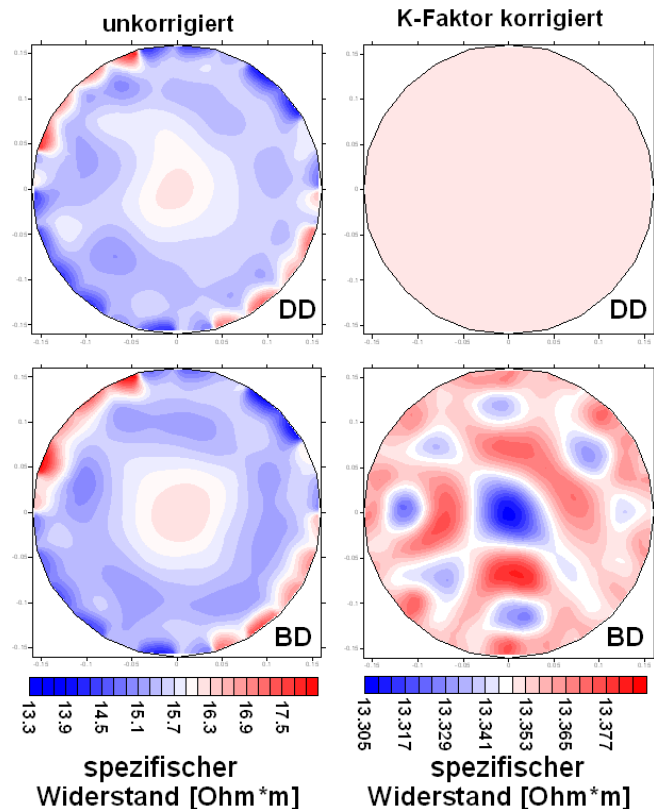
werden, indem die beiden Faktoren (aus dem Inversionsprogramm und der experimentell ermittelte) dividiert werden. Der daraus resultierenden Korrekturfaktor (C_{kor}) sollte vorab auf die Daten angewendet werden. Dabei verschwinden die zentralen Widerstandsanomalien in den Tomogrammen vollständig. Auf die Phasendarstellung hat dieser Korrekturfaktor keinen Einfluss, da der K -Faktor bei der Inversion der Phasendaten keine Rolle spielt.

Als Beispiel sind in Abbildung 4.11 die Inversionsergebnisse der Dipol-Dipol- und Bipol-Dipol-Konfiguration für $f = 1,25\text{ Hz}$ wiedergegeben. Der spezifische Widerstand des Wassers betrug zum Messzeitpunkt $13,35\ \Omega\text{m}$. In der linken Spalte sind die unkorrigierten (2D) Widerstandstomogramme zu sehen. Daneben befinden sich die korrigierten (3D) Widerstandstomogramme beider Konfigurationen. Diese sind mit einer anderen Farbskala dargestellt!

Die Änderung der Widerstandstomogramme zwischen korrigierten und unkorrigierten K -Faktoren ist offensichtlich. Während bei den unkorrigierten Daten eine höherohmige Anomalie im Zentrum zu sehen ist, verschwindet sie bei den korrigierten Daten der Dipol-Dipol-Konfiguration vollständig. Bei der BD-Konfiguration sind hingegen kleinräumige Anomalien zu beobachten, die jedoch innerhalb der Messungenauigkeit liegen (stark aufgespreizte Farbskala). Die Anomalien am Rand des Probekörpers in den unkorrigierten Tomogrammen sind auf fehlerhafte oder verunreinigte Elektroden zurückzuführen. In den korrigierten Tomogrammen verschwinden sie durch die Anwendung des Korrekturfaktors.

Die Korrekturfaktoren sind auch auf die Messungen des Probekörpers mit zusätzlichen Störkörpern anwendbar. Einen direkten Vergleich zwischen K -Faktor korrigierten und unkorrigierten Ergebnissen einer Messung mit zusätzlichen Störkörpern ist im Anhang (A.3) zu sehen.

Abbildung 4.11: Tomogramme des spezifischen Widerstands für eine Messung am wassergefüllten Probekörper bei $f = 1,25$ Hz. In der linken Spalte sind die unkorrigierten (2D) Widerstandstomogramme beider Konfigurationen zu sehen. Rechts die K-Faktor korrigierten (3D) Widerstandstomogramme. Deutlich sind die Unterschiede im spezifischen Widerstand zwischen 2D-Fall und 3D-Fall zu sehen.



4.4.2 Wasserstandshöhe

Um die Abhängigkeit der Konfigurationsfaktoren von der dreidimensionalen Ausbreitung des elektrischen Feldes abzuschätzen, wurde die Wasserstandshöhe in dem zylindrischen Probekörper variiert. Für den Versuch wurde mit sechs verschiedenen Wasserstandshöhen über der Messebene gemessen. Die leicht variierenden spezifischen Widerstände des Wassers wurden berücksichtigt. In Tabelle 4.7 ist das Verhältnis der Wasserstandshöhe L zum Radius r des Probekörpers aufgeführt.

Gemessen wurde mit der Dipol-Dipol-Konfiguration und der Bipol-Dipol-Konfiguration. Beide ergaben ähnliche Ergebnisse, so dass im Weiteren nur die Bipol-Dipol-Ergebnisse gezeigt werden.

In Abbildung 4.12 sind die unkorrigierten Widerstandstomogramme für eine Wasser-

Wasserstand [cm]	ρ_{Wasser} [Ωm]	Verhältnis L/r
1	14,04	0,0625
5	14,18	0,3125
10	14,20	0,625
15	14,26	0,9375
20	14,18	1,25
25	14,14	1,5625

Tabelle 4.7: Tabelle mit den verschiedenen Wasserstandshöhen über der Messebene, den dazugehörigen spezifischen Widerständen des Wassers und dem Verhältnis von Wasserstandshöhe L zum Radius r des Probekörpers.

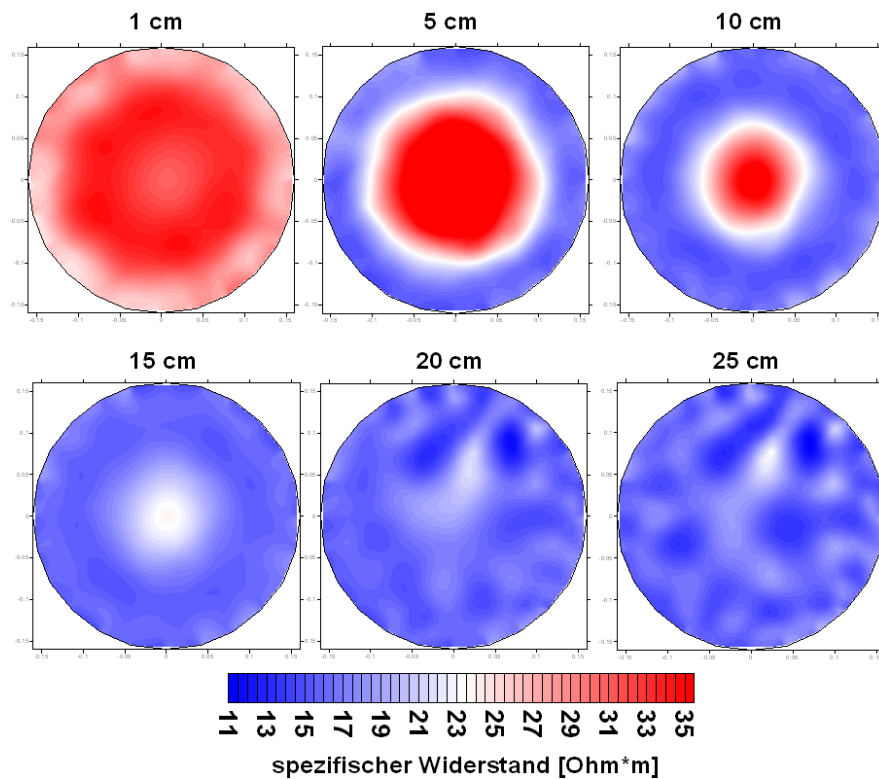
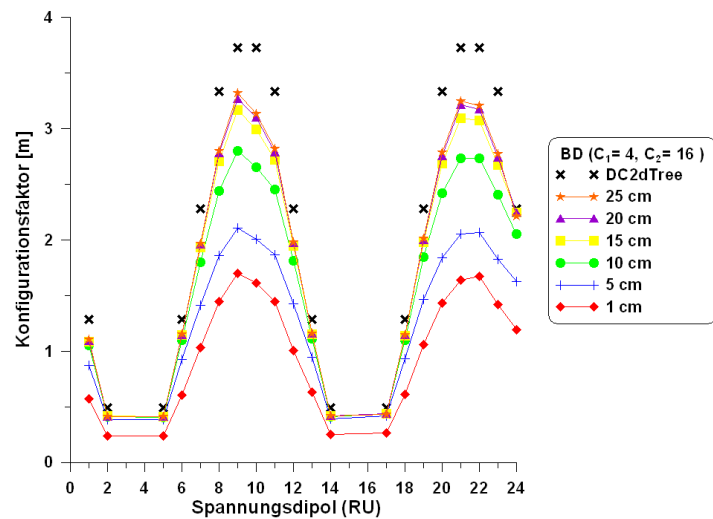


Abbildung 4.12: Unkorrigierte Widerstandstomogramme für eine Bipol-Dipol-Wassermessung am Probekörper mit unterschiedlichen Wasserstandshöhen. Im linken oberen Tomogramm befand sich die Messebene nur 1 cm unter der Wasseroberfläche, während in dem rechten unteren Tomogramm der Probekörper bis oben gefüllt war (25 cm Wasserstandshöhe über Messebene), $f = 1,25$ Hz.

messung dargestellt ($f = 1,25$ Hz). Deutlich sind in dem Tomogramm mit der niedrigsten Wasserstandshöhe (1 cm, ganz links) stark erhöhte spezifische Widerstände erkennbar. Mit steigendem Wasserpegel wird die Anomalie kleiner, bleibt jedoch im Zentrum erhalten. Ab einer Wasserstandshöhe von 20 cm scheint die Anomalie zu verschwinden, tatsächlich ist sie aber nur abgeschwächt. Das wird auch aus Abbildung 4.13 ersichtlich. Hier sind für die verschiedenen Wasserstandshöhen die berechneten Konfigurationsfaktoren (K -Faktoren) gegenüber den vom Inversionsprogramm verwendeten Faktoren für eine Bipol-Dipol-Konfiguration ($C_1 = 4$, $C_2 = 16$) aufgetragen. Es wird deutlich, dass die vom Programm verwendeten Faktoren deutlich größer sind als die experimentell bestimmten. Der Unterschied wird mit abnehmender Wasserstandshöhe immer deutlicher. Auch die Unterschiede zwischen den berechneten K -Faktoren der verschiedenen Wasserstände werden mit zunehmender Wasserstandshöhe geringer, so dass bereits ab einem Längen/Radius-Verhältnis von 1,5 die Differenzen sehr klein werden. Der Versuch konnte nur bis zu einem Längen/Radius-Verhältnis von 1,56 durchgeführt werden, da dann das Ende des künstlichen Probekörpers erreicht wurde. Für größere Verhältnisse haben *Weidelt und Weller* (1997) gezeigt, dass die Unterschiede immer geringer werden und sich die Faktoren ab einem Verhältnis von 2,0 nur noch unmerklich ändern.

Abbildung 4.13: Darstellung der Konfigurationsfaktoren vom Inversionsprogramm DC2dTree und der experimentell bestimmten K -Faktoren für verschiedene Wasserstandshöhen. Mit abnehmender Wasserstandshöhe werden die Differenzen der berechneten K -Faktoren gegenüber den vom Programm verwendeten K -Faktoren immer größer.



4.5 Auflösungsvermögen

Um das Auflösungsvermögen zu ermitteln, wurden in den mit Leitungswasser gefüllten Behälter verschiedene Objekte aus unterschiedlichen Materialien mit variierenden Abmessungen hineingestellt.

Dabei wurden die K -Faktoren für die Inversion grundsätzlich korrigiert. Die Versuche werden zum großen Teil konfigurations- und frequenzabhängig dargestellt. Zusätzlich ist im Anhang (Abb. A.3) ein Vergleich von K -Faktor korrigierten und unkorrigierten Widerstandstomogrammen für eine Messung mit Holzbalken und mit einem Plastikrohr zu finden.

4.5.1 Holzbalken

In den Probekörper wurde ein Holzbalken mit den Abmaßen 9,5 x 14,5 x 100 cm (L x B x H) gestellt. Gemessen wurde mit der Dipol-Dipol- und der Bipol-Dipol-Konfiguration für verschiedene Frequenzen. Der spezifische Widerstand des umgebenden Wassers betrug zum Zeitpunkt der Messung 13,17 Ωm .

Die Inversionsergebnisse für $f = 1,25\text{ Hz}$ und $f = 0,156\text{ Hz}$ sind in Abbildung 4.14 dargestellt. In der oberen Zeile befinden sich die Tomogramme des spezifischen Widerstands jeweils für 1,25 Hz und 0,156 Hz einer Konfiguration. Darunter sind die Tomogramme der Phasen zu sehen. Generell wird im spezifischen Widerstand eine höherohmige Anomalie im Inneren des Probekörpers bei allen Konfigurationen und Frequenzen erkannt. Die beste räumliche Auflösung (Holzprobekörper = grüner Umriss) gibt die Dipol-Dipol-Konfiguration bei 1,25 Hz wieder. Hier stimmen sowohl Lage als auch Größe des Holzprobekörpers gut überein. Die Bipol-Dipol-Konfiguration für $f = 0,156\text{ Hz}$ erkennt ebenfalls an der erwarteten Stelle eine Anomalie, die jedoch keinen so großen Widerstandscontrast aufweist wie für $f = 1,25\text{ Hz}$. Mit einer geeigneteren Farbskala ist die Anomalie auch für $f = 0,156\text{ Hz}$ zu sehen.

In der Darstellung der Phase wird der Holzprobekörper in beiden Konfigurationen nicht erkannt. Die Mehrzahl der invertierten Phasendaten deuten auf einen unpolarisierbaren Körper hin (niedrige Phasenwerte). Die Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig

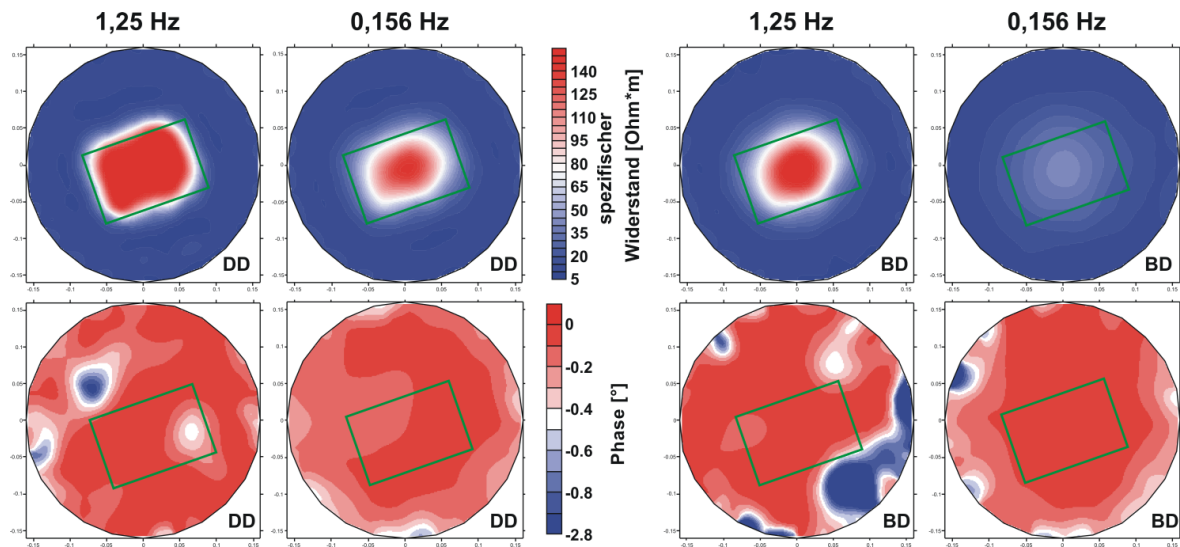


Abbildung 4.14: Tomogramme des spezifischen Widerstands (oben) und der Phase (unten) für eine Messung am künstlichen Probekörper in Abhängigkeit von der Konfiguration (DD links, BD rechts) und der Frequenz. Ein Holzbalken wurde in den Probekörper hineingestellt. Grüner Umriss = Lage des Holzprobekörpers.

von denen der Wassermessung.

Deutlicher als bei den Widerstandsergebnissen ist in der Phasendarstellung auch der Einfluss von unkorrelierbaren Artefakten und Elektrodeneffekten zu sehen. Ursache kann die hohe Sensibilität der Phase auf Ankopplungsprobleme und elektromagnetische Störungen am Messarbeitsplatz sein.

4.5.2 Plastikrohr

Beim nächsten Versuch wurde mit einem Plastikrohr ($d = 5 \text{ cm}$, $L \sim 1 \text{ m}$) gearbeitet. Dieses wurde seitlich versetzt in den Probekörper hineingestellt. Der spezifische Widerstand des Wasser betrug zum Messzeitpunkt $13,37 \Omega \text{m}$.

In Abbildung 4.15 sind die konfigurations- und frequenzabhängigen Ergebnisse zu sehen. In der obersten Zeile sind die Tomogramme des spezifischen Widerstands für die Bipol-Dipol-Konfiguration dargestellt. Darunter befinden sich die der Dipol-Dipol-Konfiguration. In der untersten Zeile sind die Phasenergebnisse für die Dipol-Dipol-Konfiguration zu sehen. Auf die Darstellung der Phasentomogramme der Bipol-Dipol-Konfiguration wurde verzichtet, da sie denen der DD-Konfiguration sehr ähnlich sind und keine weitere Erkenntnis bringen.

Generell wird für beide Konfigurationen das Rohr in seiner Lage und Größe sehr gut erkannt. Dabei zeigte sich nur eine geringe Frequenzabhängigkeit. Der Unterschied zwischen den beiden Konfiguration ist ebenfalls sehr gering.

Die Auswertung der Phasen brachte, analog zum Holzbalken, keine zusätzlichen Aussagen. Mit steigender Frequenz nehmen die Artefakte in den Phasendarstellungen zu. Im Anhang, Abbildung A.4, sind zusätzlich die Tomogramme zwei weiterer Plastikrohre zu sehen.

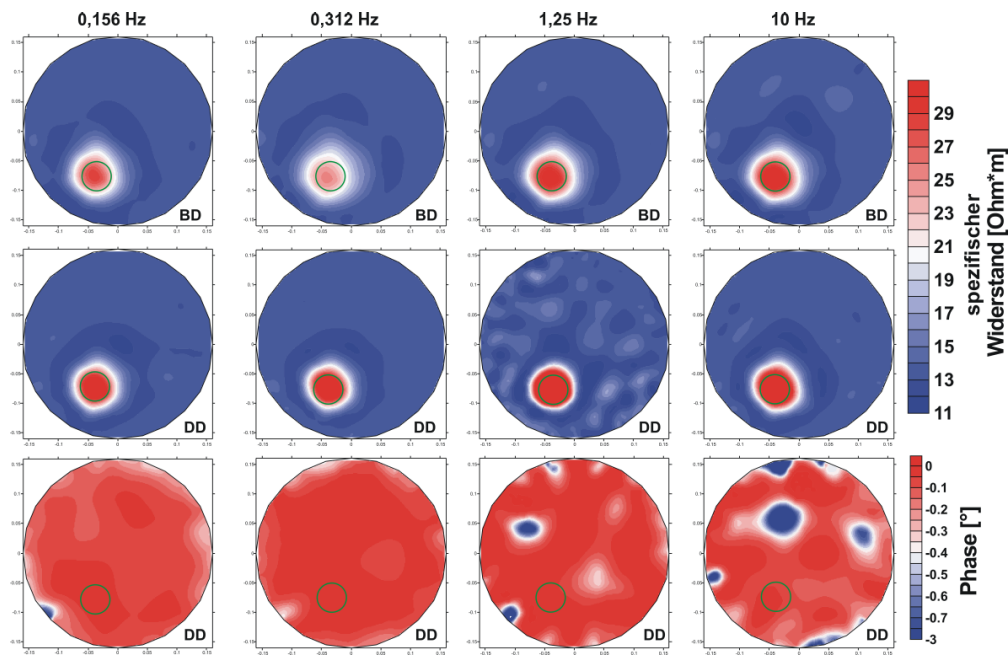


Abbildung 4.15: Vergleich der Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für eine Messung mit Plastikrohr ($d = 5$ cm), in Abhängigkeit von der Konfiguration und der Frequenz. Unabhängig davon wird das Rohr in seiner Lage und Größe gut aufgelöst. Die Phasenauswertung hingegen zeigt einen unpolarisierbaren Körper.

4.5.3 Metallrohr

Ein Metallrohr mit einem Durchmesser von ca. 3,5 cm wurde ebenfalls dezentral in den wassergefüllten Probekörper gestellt. Es wurde erneut mit einer Bipol-Dipol- und einer Dipol-Dipol-Konfiguration bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Der spezifische Widerstand des Wassers betrug zum Messzeitpunkt $11,20 \Omega\text{m}$.

In Abbildung 4.16 sind für die Frequenz $f = 1,25$ Hz die Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für die BD- und DD-Konfiguration dargestellt. Das Metallrohr wird in den Tomogrammen des spezifischen Widerstands in beiden Konfigurationen (Abb. 4.16a, c) als Anomalie an der korrekten Position angezeigt, allerdings zu groß und als eine unerwartete, höherohmige Anomalie. Die höheren spezifischen Widerstände könnten damit erklärt werden, dass das Rohr nicht aus reinem Stahl bestand, sondern aus einer Legierung, die höhere spezifische Widerstände hervorruft. Zudem ist der Wertebereich der invertierten Daten gering. Er liegt zwischen $9,8$ und $13,5 \Omega\text{m}$. Einen großen Unterschied zwischen dem spezifischen Widerstand des Wassers und des Rohres gibt es daher nicht. In den Tomogrammen der Phase ist eine höherphasige Anomalie bei der Bipol-Dipol-Konfiguration (Abb. 4.16b) an der erwarteten Position zu sehen. Allerdings sind noch weitere Anomalien unregelmäßig im Probekörper verteilt, was auf eine zufällige Anomalie an der korrekten Stelle hindeutet. In der Dipol-Dipol-Konfiguration (Abb. 4.16d) ist eine höherphasige Anomalie an anderer Stelle zu sehen. Des Weiteren wurde bei mehreren Frequenzen das Rohr gar nicht erkannt, so dass es letztendlich für keine Konfiguration möglich war, das Metallrohr im Phasentomogramm sicher zu lokalisieren.

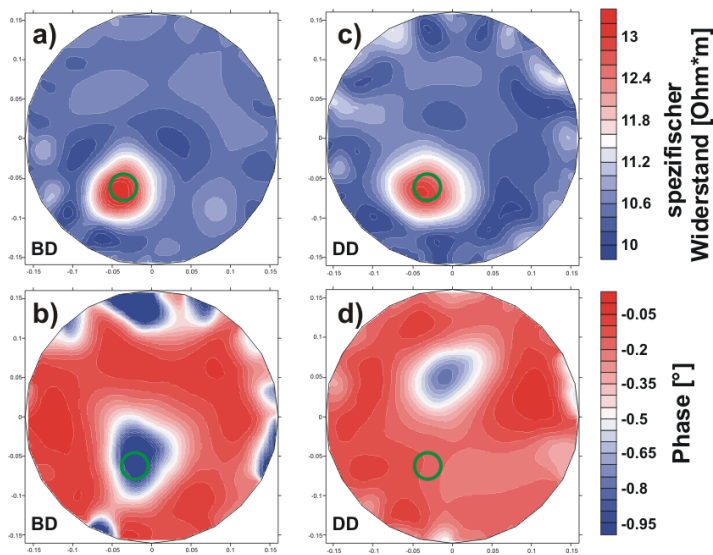


Abbildung 4.16: Vergleich der Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für eine Messung mit Metallrohr ($d \sim 3,5$ cm), in Abhängigkeit von der Konfiguration.

4.6 Erkenntnisse aus den Messungen am zylindrischen Probekörper

Ziel dieses Kapitels war eine Abschätzung der Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens der Spektralen Induzierten Polarisation für tomographische Messungen.

Dabei wurde zunächst die theoretische Genauigkeit des verwendeten Messgerätes SIP-256C (*Radice* (2004a)) anhand eines Widerstandstestnetzwerks überprüft. Die Ergebnisse ergaben eine sehr hohe Genauigkeit (siehe Anhang A). Elektrodenart und Elektrodenmaterial spielen bei elektrischen Messungen ebenfalls eine Rolle. Dabei ist es am sinnvollsten, unpolarisierbare Elektroden zu nutzen. Da diese aber für Baummessung unpraktisch sind und andere Autoren (*Schleifer und Junge* (2004), *LaBrecque et al.* (2007)) zu dem Schluss kommen, dass herkömmliche Stahlelektroden ausreichend gute Ergebnisse liefern, können für die Feldmessungen Stahlnägel genutzt werden.

Noch wichtiger als das Elektrodenmaterial selbst ist die Ankopplung der Potentialelektroden an den Messkörper. Durch hohe Ankopplungswiderstände wird gerade bei hohen Frequenzen die zu messende Spannung verfälscht (*Radice* (2008b), RC-Effekt). Dadurch entsteht ein Tiefpassfilter, der sich in einer proportionalen Abhängigkeit des Phasenwertes zur Frequenz äußert. Hohe Übergangswiderstände machen sich auch durch höhere Fehler bemerkbar. So wächst der Fehler ungefähr proportional zum Übergangswiderstand.

Versuche haben gezeigt, dass der Bereich der ersten, wasserführenden Jahrringe eines Baumes als Ankopplungsmedium optimal ist. Dort liegen die Übergangswiderstände am lebenden Baum um 1 - 5 k Ω . Am zylindrischen Probekörper waren sie wesentlich höher. Bei den durchgeführten Untersuchungen lagen sie im Mittel bei 82 k Ω , was sich sehr nachteilig auf die Messgüte ausgewirkt hat. Da die Phase sehr sensibel auf äußere Störungen reagiert, sind die nicht realistischen Anomalien in den Phasentomogrammen vor allem auf die Elektrodenprobleme des künstlichen Probekörpers zurückzuführen.

Sinnvolle Tomographiemessungen an Bäumen bedürfen einer möglichst auflösungsstarken und zeitsparenden Elektrodenkonfiguration. In der Vergangenheit haben Autoren hauptsächlich mit der Dipol-Dipol-Konfiguration gearbeitet. Sie ist hochauflösend

und kann mithilfe einer Multielektrodenapparatur sehr effektiv viele Daten aufnehmen. Leider ist sie für frequenzabhängige Messungen zeitintensiv. Als mögliche Alternative wird die Bipol-Dipol-Konfiguration vorgeschlagen. Ihr Vorteil liegt in der großen Zeiterparnis gegenüber der Dipol-Dipol-Konfiguration und in der Gewährleistung des Stromflusses durch die Mitte des Baumes aufgrund der gegenüberliegenden Anordnung der Stromelektroden. Ein Nachteil kann aufgrund der geringen Datenanzahl eine reduzierte Auflösung sein, die sich vor allem bei fehlerbehafteten Datensätzen bemerkbar macht. Prinzipiell zeigt sich jedoch, dass diese Konfiguration für tomographische Messungen geeignet ist, gerade bei den zeitintensiven Messungen eines breiten Frequenzspektrums.

Bei der Inversion der gemessenen Daten konnte des Weiteren belegt werden, dass der Unterschied zwischen zwei- und dreidimensional ausgewerteten Daten bei einem kleinen Längen-Radius-Verhältnis groß ist. So ergab die zweidimensionale Auswertung der Daten des zylindrischen Probekörpers zu hohe spezifische Widerstände in dessen Zentrum. Diese konnten durch Berücksichtigung der experimentell bestimmten Konfigurationsfaktoren korrigiert werden. Dabei zeigte sich, dass mit steigendem Längen-Radius-Verhältnis diese Korrektur vernachlässigbar wird. In eigenen Versuchen konnte dies nur bis zu einem Verhältnis von 1,56 gezeigt werden. Für größere Verhältnisse haben dies *Weidelt und Weller* (1997) nachgewiesen.

Das Auflösungsvermögen der beiden Konfigurationen (Dipol-Dipol und Bipol-Dipol) mit den korrigierten K -Faktoren im spezifischen Widerstand ist gut. Auch für den unkorrigierten spezifischen Widerstand bei hinreichend großem Längen-Radius-Verhältnis ist die Auflösung ausreichend gut. Das ist insbesondere wichtig für die Baummessungen, da dort eine Korrektur des K -Faktors aufgrund der unregelmäßigen Geometrie des Baumes nicht möglich ist.

Eine Auswertung der Phasen am Probekörper brachte bisher am künstlichen Probekörper keine zusätzlichen Aussagen. So konnte in den Phasentomogrammen kein Störkörper (Holzbalken, Plastikrohr, Metallrohr) eindeutig erkannt werden.

Die Auflösung von Strukturen in den Phasentomogrammen ist momentan noch sehr unbefriedigend. Dies liegt vermutlich in erster Linie an der Konstruktion des künstlichen Probekörpers und der daraus resultierenden ungenügenden Elektrodenankopplung. Deshalb sind in naher Zukunft weitere Versuche an modifizierten Probekörpern nötig um eindeutige Aussagen zur Auflösung zu machen. Diese werden jedoch nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sein.

5 Labormessungen

Um den komplexen elektrischen Widerstand von Eichenkernholzproben zu untersuchen, wurden Messungen zur Anisotropie, zur Entsättigung und zum Einfluss des Pilzbefalls durchgeführt. Dazu wurden jeweils zylindrische Holzproben mit dem Durchmesser $d \approx 20$ mm und der Länge $l \approx 70$ mm geschnitten. Dies geschah unter Berücksichtigung der Anisotropierichtungen. Die Proben wurden in die Messzelle aus Abbildung 3.3 eingebaut. Als Ankopplungsmittel diente einprozentiges Agar-Agar-Gel. Bei dem Versuch zur Anisotropie wurde destilliertes Wasser benutzt. Die Messungen fanden im Klimaschrank bei konstanten 20°C statt. Jede Probe wurde über den Frequenzbereich zwischen 1 mHz und 1 kHz mehrmals gemessen. Ein Beispiel für eine Widerholungsmessung mit den zugehörigen Messfehlern ist im Anhang (Abbildung B.1) dargestellt.

5.1 Anisotropie

Holz ist stark anisotrop. Dies ist bedingt durch den strukturellen Aufbau von Bäumen sowie durch standort- und wuchsbedingte Einflüsse (*Niemz* (1993)). Die Anisotropie wirkt sich auf elektrische Messungen aus (z. B. *Kollmann* (1951)). Um diesen Einfluss auch auf die frequenzabhängigen IP Messungen nachzuweisen, wurden acht axiale, vier radiale und sieben tangentiale Eichenkernholzproben untersucht. Die axialen Proben sind in unterschiedlichem Abstand von der Stammachse (Mark) entnommen (siehe Abbildung 5.1).

Um den Einfluss unterschiedlichen Feuchtegehalts auszuschließen, wurden die Proben mit destilliertem Wasser gesättigt.

Messungen

In Abbildung 5.2 sind die Spektren des spezifischen Widerstands, der Phase sowie der reellen und imaginären Leitfähigkeit für die acht untersuchten axialen Proben dargestellt. Dabei lässt sich sowohl im spezifischen Widerstand als auch in der Phase eine eindeutige Abhängigkeit der axialen Proben von der Entfernung zum Mark erkennen. Mit Ausnahme von Probe A1b (Nähe Mark) lässt sich eine Abnahme des spezifischen Widerstands mit zunehmender Entfernung vom Baumrand beobachten. So hat Probe A8, die sich am äußersten Rand (Nähe Splintholz) befindet, den höchsten spezifischen Widerstand (um $160\ \Omega\text{m}$). Bei allen nachfolgenden Proben (A7-A2) werden die spezifischen Widerstände immer geringer bis zu ca. $85\ \Omega\text{m}$ für Probe A2. Erwartungsgemäß sollten die Proben zur Stammachse hin immer höhere spezifische Widerstände aufweisen, da mit steigendem Alter des Holzes (also Richtung Bauminneres) die axialen Leitungsbahnen verschlossen werden (verthyllen) und nicht mehr zum Wasser- und

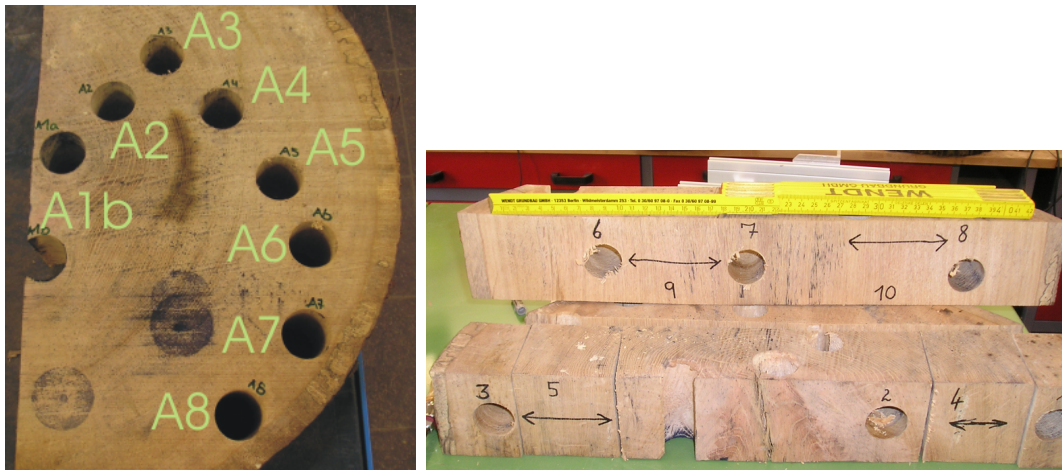


Abbildung 5.1: Fotos der Probenentnahme für die Anisotropiemessungen. **Links:** axiale Probenentnahme. **Rechts:** radiale und tangentiale Probenentnahme.

Nährstofftransport beitragen. Dagegen trat auch bei weiteren Eichenkernholzuntersuchungen die beschriebene Abnahme des spezifischen Widerstands zum inneren Kernholz hin auf.

Deutliche Unterschiede in der Phase sind ebenfalls in Abbildung 5.2 zu sehen. Der Phaseneffekt steigt mit zunehmendem Abstand von der Stammachse. Damit hat Probe A8 nicht nur die höchsten spezifischen Widerstände, sondern auch den höchsten Phaseneffekt (Phasenmaximum um -2°). Dagegen sind die Phaseneffekte für die Proben A1b und A2 klein (um $-0,6^\circ$). Des Weiteren verschiebt sich das Phasenmaximum mit steigendem Abstand vom Mark zu höheren Frequenzen hin.

Die reellen Leitfähigkeiten verhalten sich invers zum spezifischen Widerstand.

Die Verteilung der imaginären Leitfähigkeiten ist leicht unterschiedlich zu der Phasenverteilung. Zwar haben die innersten Proben (A1b, A2) ebenfalls die geringsten Leitfähigkeiten, die restlichen Proben verlaufen jedoch ziemlich ähnlich (Ausnahme: A7). Das deutet auf einen ähnlichen Einfluss der Grenzflächenpolarisation hin.

In Abbildung 5.3 sind die Spektren für ausgewählte Proben aus den drei verschiedenen Orientierungen dargestellt. Dabei zeigte sich ein stark unterschiedliches Verhalten. Während die axialen Proben (rote Symbole) spezifische Widerstände zwischen $100\ \Omega\text{m}$ und $200\ \Omega\text{m}$ aufweisen, liegen die spezifischen Widerstände der radialen Proben mehr als doppelt so hoch (um $410\ \Omega\text{m}$) und die der tangentialen Proben um ein Vierfaches höher (um $700\ \Omega\text{m}$). Ebenfalls deutliche Unterschiede sind in den Phasenspektren zu sehen. Dabei zeigen die axialen Proben mit Abstand die ausgeprägtesten Phasenverläufe. Während die tangentialen Proben beinahe keinen Phaseneffekt haben (Werte konstant um max. $-0,4^\circ$), beträgt das Phasenmaximum der radialen Proben um $-0,6^\circ$. Während das Phasenmaximum der radialen Proben um $0,1\ \text{Hz}$ liegt, tritt es bei den axialen Proben um $0,01\ \text{Hz}$ auf. Die reellen Leitfähigkeiten verhalten sich invers zu den spezifischen Widerständen. Die imaginären Leitfähigkeiten verhalten sich analog zur Phase, abgesehen von der schon in Abbildung 5.2 gezeigten Unabhängigkeit der imaginären Leitfähigkeit vom Entnahmeort bei einigen axialen Proben. Die für die imaginäre Leitfähigkeit ausschlaggebenden Strukturen an den Grenzflächen unterscheiden

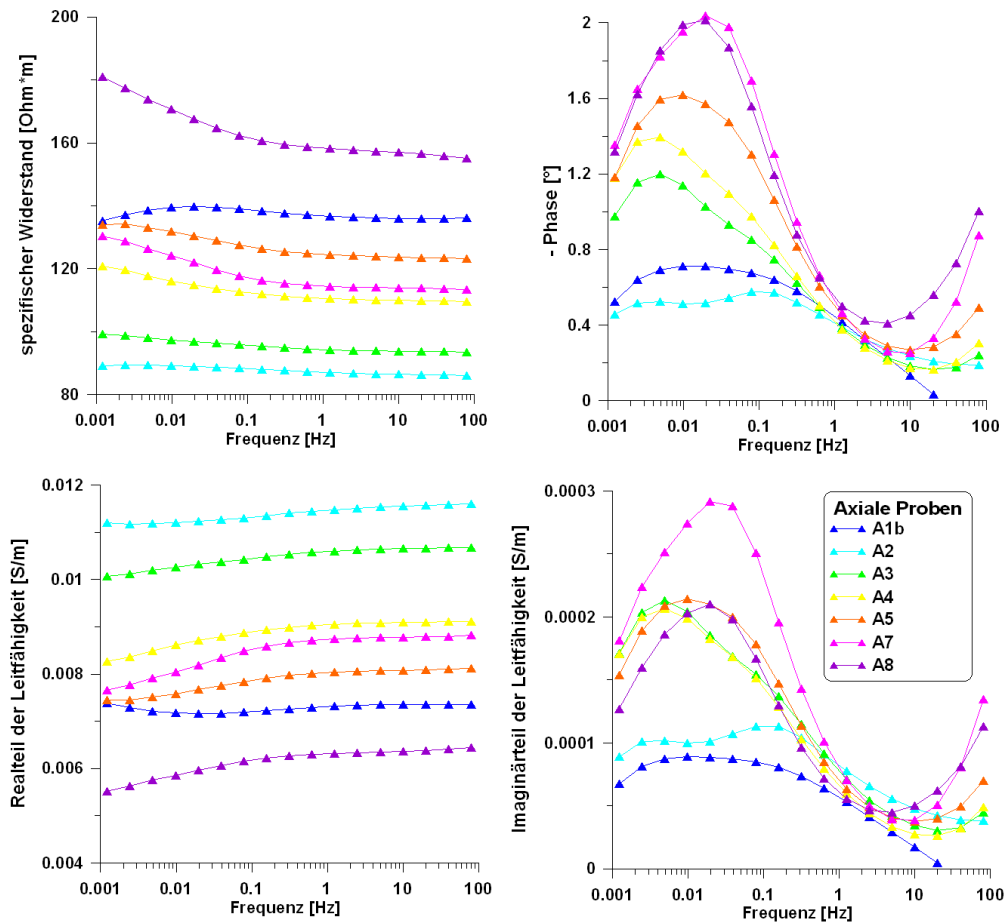


Abbildung 5.2: Spektren der axialen Eichenkernholzproben. Es zeigt sich eine Abhängigkeit des spezifischen Widerstands, der Phase und der reellen und imaginären Leitfähigkeit vom Entnahmeort. Proben von der Stammachse (Probe A1b, A2) sind in der Tendenz leitfähiger und weniger polarisierbar als Proben in der Nähe des Baumrandes (Probe A8).

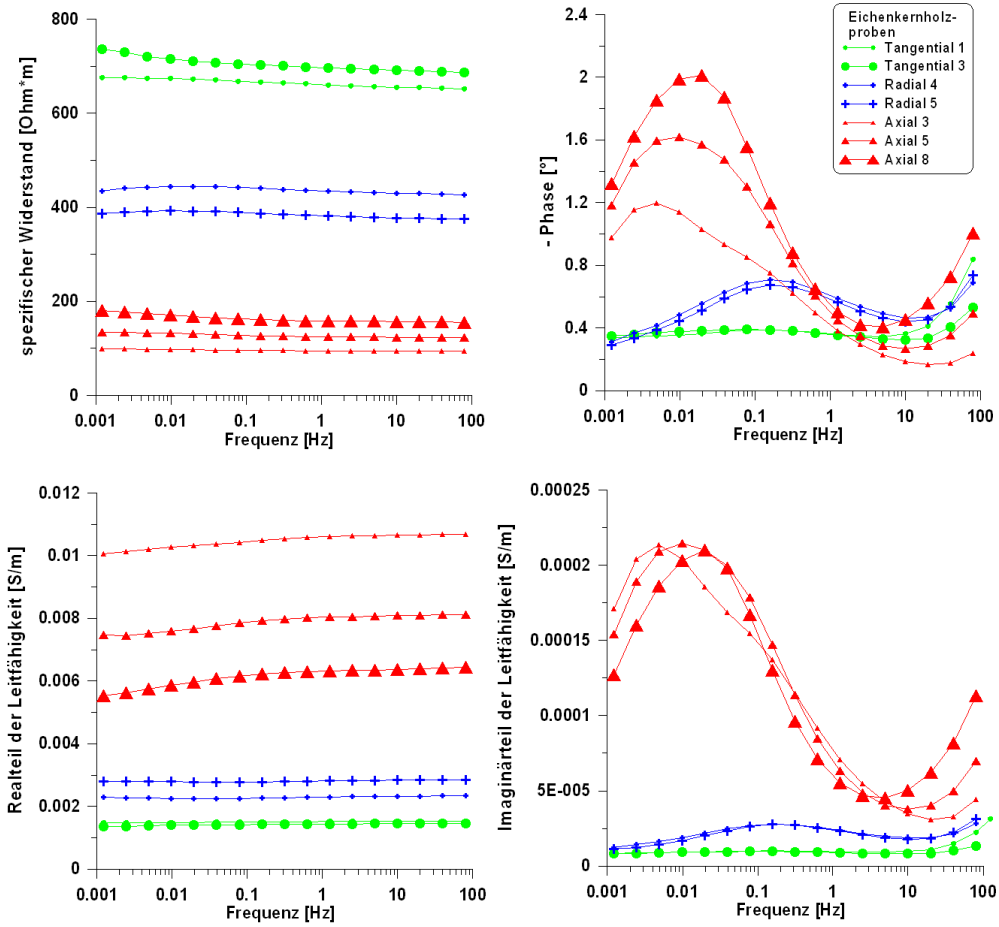


Abbildung 5.3: Vergleich der richtungsabhängigen Messungen von Eichenkernholzproben. Dabei sind deutliche Unterschiede zwischen den axialen, radialen und tangentialen Proben zu sehen.

sich deutlich zwischen den axialen, radialen und tangentialen Proben.

In der Geophysik wird bei einem geschichteten Untergrund ein sogenannter Anisotropiekoeffizient A für den spezifischen Widerstand angegeben. Dieser berücksichtigt die Anisotropie der Gesteinschichten. In der Praxis können dabei Anisotropiekoeffizienten bis 2,5 auftreten. In Tabelle 5.1 sind die Anisotropiekoeffizienten für den spezifischen Widerstand der gemessenen Eichenkernholzproben angegeben. Sie wurden berechnet nach

$$A = \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_j}} \quad (5.1)$$

mit $i, j = \text{axial, radial, tangential}$. Der höchste durchschnittliche Anisotropiekoeffizient (2,68) tritt zwischen den axialen und tangentialen Proben auf.

Die Proben wurden zusätzlich einer Untersuchung des Poreneingangsdurchmessers mittels Quecksilberporosimetrie und einer Heliumdichtebestimmung unterzogen. Diese fand zwei Jahre nach der Messung der obigen Spektren statt. In diesen zwei Jahren

i, j	A_{\max}	A_{\min}	A_{\varnothing}
axial, radial	2,15	2,01	2,08
axial, tangential	2,64	2,71	2,68
radial, tangential	1,31	1,35	1,33

Tabelle 5.1: Berechnete Anisotropiekoeffizienten für den spezifischen Widerstand bei der Frequenz $f = 0,156$ Hz.

wurden die Proben luftdicht verschlossen in einem Behälter mit destilliertem Wasser gelagert. Direkt vor den Analysen wurden erneut SIP-Messungen durchgeführt. Ein Vergleich zwischen den in Abbildung 5.2 dargestellten, axialen Messungen und den Messungen nach zweijähriger Wartezeit ist im Anhang (Abbildung B.2) zu sehen. Generell sind die Ergebnisse der ersten Messung gut reproduzierbar, vor allem in der Phase. Die spezifischen Widerstände sind gegenüber dem ersten Messversuch leicht erhöht (durchschnittlich um $40 \Omega m$). Vermutlich haben sich im Laufe der Jahre Ionen aus den Holzproben gelöst, die aufgrund von Wasseraustausch nicht mehr für den Ladungstransport zur Verfügung standen.

Die Bestimmung der Poreneingangsdurchmesser mit der Quecksilberporosimetrie wurden an allen Proben nach *Klobes et al.* (2006) vorgenommen. Die dabei zugrundeliegende Washburn-Gleichung

$$r = \frac{-2\gamma \cos(\Theta)}{p} \quad (5.2)$$

mit r = Porenradius, γ = Oberflächenspannung des Quecksilbers [$480(\text{dyne/cm})$], Θ = Benetzungswinkel [140°] und p = als angewandter Absolutdruck, berechnet die Porenradien für metallische Oberflächen. Für Holzoberflächen ist der Benetzungswinkel jedoch verschieden, was hierbei nicht berücksichtigt wurde.

Ein Unterschied zwischen den axialen, radialen und tangentialen Proben war bei dieser Methode nicht zu erwarten, da das Quecksilber von allen Seiten in die Probe gedrückt wird. Demzufolge sind sich die Ergebnisse auch recht ähnlich (siehe Abbildungen im Anhang B.3 bis B.5). In Abbildung 5.4 ist beispielhaft für drei axiale Proben (A1b, A4, A7) die Verteilung der Poreneingangsdurchmesser angegeben. Auffällig ist die bimodale Verteilung. In den untersuchten Holzproben gibt es vermehrt Poreneingänge um $0,4 \mu m$ und $10 \mu m$. Dabei liegen die dominanten Poreneingangsdurchmesser bei $10 \mu m$. Bei den axialen Proben lässt sich eine leichte Abhängigkeit vom Probenentnahmeort feststellen. Mit zunehmendem Abstand von der Stammachse erhöht sich das differentielle Porenvolumen beim dominanten Poreneingangsdurchmesser.

Die aus der Quecksilberporosimetrie ebenfalls gewonnenen Porositäten sind für alle Proben in Tabelle 5.2 angegeben. Sie liegen im Schnitt bei $55,6\%$. Für die axialen Proben ist eine Zunahme der Porosität zum Baumrand hin zu beobachten. In Abbildung 5.5 (links) sind die Porositäten der axialen Proben aufgetragen, rechts die durch Heliumdichtebestimmung ermittelte Dichte. Dabei nimmt die Porosität deutlich vom inneren Kernholz des Baumes zum äußeren Kernholz hin zu. Das Kernholz wird mit steigendem Alter weniger porös. Demzufolge wird die Dichte immer größer. Sie steigt von $1,39 \text{ g/cm}^3$ (A8) bis $1,45 \text{ g/cm}^3$ (A1b) an.

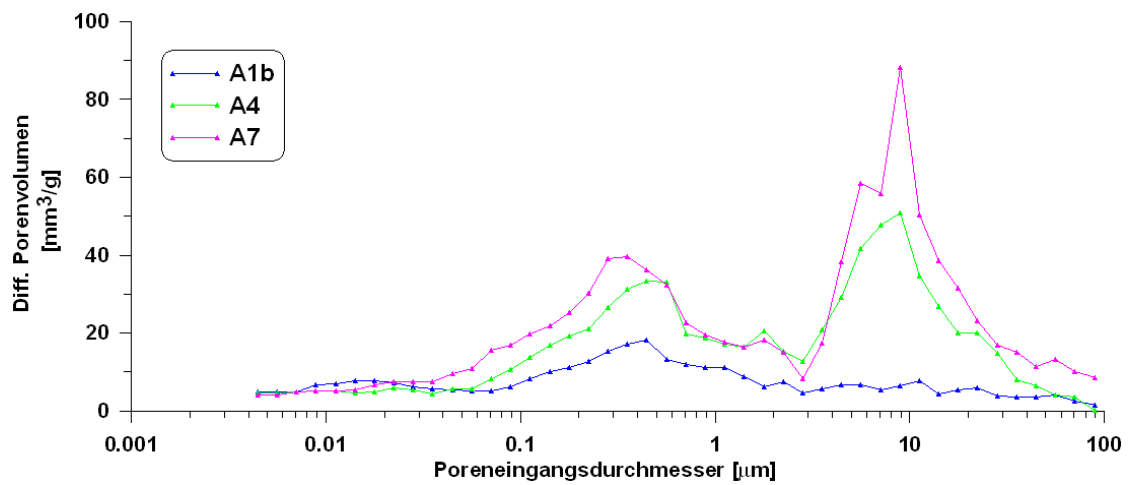


Abbildung 5.4: Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für drei axiale Eichenkernholzproben.

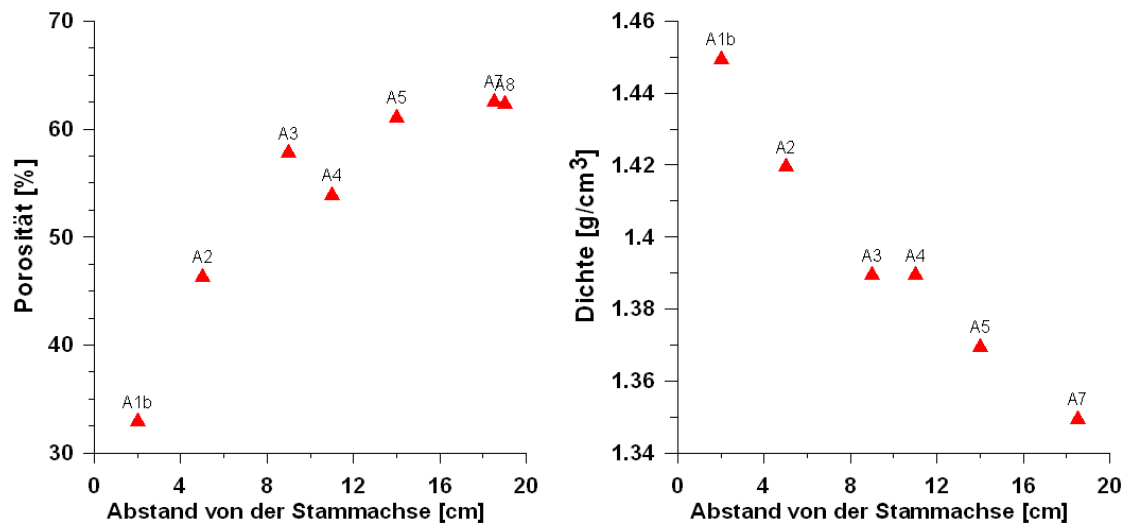


Abbildung 5.5: Porosität (links) und Dichte der axialen Proben aufgetragen gegen die Entfernung von der Stammachse (Mark). Die Porosität nimmt zur Stammachse hin ab und die Dichte zu.

Probe	Porosität [%]	Probe	Porosität [%]	Probe	Porosität [%]
A1b	33,1	R4	55,6	T1	60,1
A2	46,5	R5	55,1	T2	47,2
A3	57,4	R9	58,9	T3	63,4
A4	54,1	R10	57,0	T6	55,4
A5	61,3			T7	52,8
A6	46,3			T8	63,9
A7	62,7			T11	63,0
A8	62,5				

Tabelle 5.2: Porositäten alle Proben des Anisotropieversuchs.

Aus den IP-Spektren der Proben wurde zusätzlich die mittlere Relaxationszeit durch Debye-Zerlegung nach *Nordsiek und Weller* (2008) berechnet. Sie gibt an, wie lange die polarisierten Ionen brauchen, um nach Abschalten des elektrischen Feldes wieder in ihre Ausgangslage zurückzufinden. Dabei deuten hohe Polarisationszeiten auf eine größere Porenausdehnung hin, während kurze Polarisationszeiten durch kleine Poren verursacht werden.

In Abbildung 5.6 sind diese mittleren Relaxationszeiten aufgetragen gegen den dominanten Poreneingangsdurchmesser mit dem höchsten Porenvolumenanteil (um $10\ \mu\text{m}$). Die Spanne der dominanten Poreneingangsdurchmesser ist gering. Deutlich ist aber eine Unterteilung in der mittleren Relaxationszeit zu sehen. Die axialen Proben zeigen die größten Relaxationszeiten, radiale und tangentiale Proben geringere. Innerhalb der axialen Proben ergibt sich zusätzlich ein Gefälle zwischen den Stammachsennahen Proben (A1b - größte Relaxationszeit) und den Randproben (A7, A8 - geringere Relaxationszeiten).

Das kann sehr gut mit dem Holzaufbau erklärt werden. Holzzellen in axialer Richtung haben die längsten Ausdehnungen (vor allem im noch unverkerntem Splintholz, vgl. Kapitel 2.2.1), während die Holzzellen in radialer und tangentialer Richtung wesentlich kürzer sind.

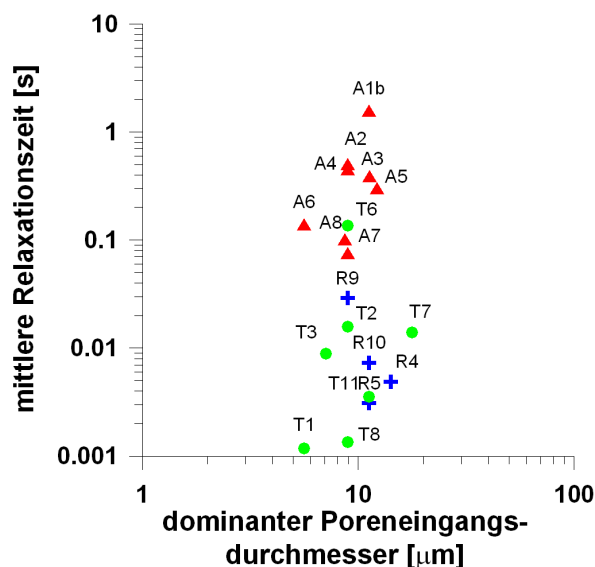


Abbildung 5.6: Mittlere Relaxationszeit aufgetragen über den dominanten Poreneingangsdurchmesser für axiale, radiale und tangentiale Eichenkernholzproben.

5.2 Entsättigung

Da der elektrische Widerstand stark von der Holzfeuchte abhängt (Kap. 2.4.1), wurden Entsättigungsmessungen an Eichenkernholzproben unter Berücksichtigung der Anisotropie durchgeführt. Die aus dem inneren Kernholz stammenden Proben wurden zu Beginn mit destilliertem Wasser gesättigt. Anschließend wurden die Probekörper gewogen, schrittweise evaporativ getrocknet und gemessen. Die absolute Holzfeuchte u (Wassergehalt) wurde berechnet nach

$$u = \frac{m_u - m_{darr}}{m_{darr}} \cdot 100 \% . \quad (5.3)$$

Als Ankopplungsmedium wurde Agar-Agar-Gel genutzt, um einer Feuchteaufnahme in der Messzelle entgegenzuwirken. Die Versuche konnten (je nach Orientierung der Probe) bis zu einer Holzfeuchte von ca. 20 % durchgeführt werden. Unterhalb dieser Holzfeuchte war eine Widerstandsmessung nicht mehr möglich, da die Übergangswiderstände zu hoch waren. Der Fehler der Messung nahm mit abnehmender Holzfeuchte zu, so dass bereits der Bereich zwischen 20 % - 30 % stark gestört war. Es wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt.

Messungen

Abbildung 5.7 zeigt die Spektren der ersten Versuchsreihe. Dabei sind links die spezifischen Widerstände und rechts die Phasen abgebildet, jeweils für axiale (oben), radiale (mittig) und tangentiale (unten) Proben.

In allen Widerstandsdiagrammen ist eine Abnahme des spezifischen Widerstands mit zunehmender Holzfeuchte zu sehen. Zusätzlich sind die schon in den Anisotropieuntersuchungen festgestellten Unterschiede zwischen den axialen und radialen/tangentialen Proben zu erkennen. Der Abfall des spezifischen Widerstands zu sehr niedrigen Frequenzen hin ist vermutlich auf eine nicht beabsichtigte Feuchtezunahme der Probe in der Messzelle zurückzuführen. Bei der ca. zweieinhalbstündigen Messung gibt das Agar-Agar-Gel etwas Wasser an die Probe ab. Dies geschieht vor allem bei den axialen Proben, da bei ihnen eine schnellere Wasseraufnahme (aber eine langsamere Wasserabgabe) beobachtet wurde.

In den Phasenspektren (Abb. 5.7 rechts) ist eine anfängliche Zunahme des Maximums mit abnehmender Wassersättigung zu beobachten. Zu sehr niedrigen Holzfeuchten hin nimmt die Phasenverschiebung wieder ab. Am deutlichsten ist das bei den radialen Proben zu sehen. Die Frequenz des Phasenmaximums liegt für diese Proben bei 0,183 Hz. Ab einer Frequenz von ca. 100 Hz zeigen sich bei den Messungen deutlich elektromagnetische Kopplungseffekte (ähnlich *Börner et al.* (1996)). Im Unterschied zu den Phasenspektren aus Kapitel 5.1 zeigten die axialen Proben kein ausgeprägtes Phasenverhalten bei $f = 0,01 \text{ Hz}$, dafür aber einen untypischen steilen Abfall bei hohen Frequenzen. Vermutlich ist der Phasenabfall auf eine Störung in dem genutztem Meskanal zurückzuführen.

Im Gegensatz zu *Binley et al.* (2005), die Entsättigungsversuche an Sandsteinen durchführten, zeigte sich bei den radialen Holzproben keine Verschiebung des Phasenmaximums zu höheren Frequenzen hin bei zunehmender Entsättigung. Auch die von *Krusch-*

witz (2007) beobachtete, sofort einsetzende Abnahme des Phaseneffektes mit zunehmender Entsättigung für Sandstein und Porenbetonproben entspricht nicht dem hier beobachteten Verhalten. Allerdings ließen sich an Ziegeln ähnliche Resultate wie hier beobachten.

Für die in Abbildung 5.7 gezeigten Spektren sind in Abbildung 5.8 links der spezifische Widerstand und die Phase für die Frequenz des Phasenmaximums ($f = 0,183 \text{ Hz}$) über die Sättigung aufgetragen (Vollsättigung = 1). Rechts dargestellt sind Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit normiert auf ihren Wert bei Vollsättigung.

Wie schon in Abbildung 5.7 zu erkennen, steigen sowohl spezifischer Widerstand als auch Phase mit Entsättigung an. Der Anstieg der Phase beruht zum großen Teil darauf, dass sich eine Änderung im spezifischen Widerstand immer auch auf die Phase auswirkt, auch wenn sich der Polarisationsanteil der elektrischen Leitfähigkeit (Imaginärteil) nicht ändert (vgl. Gleichung 3.15). So ist der Phasenanstieg mit zunehmender Entsättigung vorwiegend auf die eingeschränkte Leitfähigkeit durch den Porenraum zu erklären (*Ulrich und Slater* (2004)).

Abbildung 5.8 zeigt des Weiteren, dass der reelle Leitfähigkeitsanteil für alle drei Orientierungen stärker abnimmt als der Anteil der imaginären Leitfähigkeit. Daraus ziehen *Ulrich und Slater* (2004) in ihren Entsättigungsversuchen an Lockersteinsedimenten den Schluss, dass die Entsättigung auch einen Einfluss auf die Polarisation hat, dieser jedoch geringer ist als die (stärker abnehmende) reelle Leitfähigkeit. Die hier vorliegenden Ergebnisse lassen ähnliche Schlüsse zu.

Zusätzlich zu diesem Versuch wurden aus demselben Stammabschnitt weitere Proben entnommen und untersucht. Damit sollte die Reproduzierbarkeit überprüft werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.9 und 5.10 dargestellt. Im Gegensatz zu Versuchsreihe 1, wo die Phase erst im letzten Entsättigungsschritt abnahm, steigt die Phase nur noch bis zu einer Entsättigung von ca. 0,5 an (Holzfeuchte von ca. 50 %). Mit fortschreitender Entsättigung fällt sie dann ab. Der spezifische Widerstand nimmt dagegen kontinuierlich mit Entsättigung zu.

In Tabelle 5.3 sind die experimentell bestimmten Sättigungsexponenten n und ν für alle drei Versuchsreihen aufgelistet (vgl. Gleichung 3.12). Dabei lässt sich erkennen, dass der Anstieg der reellen Leitfähigkeit n nicht mehr zwangsläufig größer ist als der Anstieg der imaginären Leitfähigkeit ν . Für die axialen und radialen Proben ist im Durchschnitt der Anstieg der reellen Leitfähigkeit größer als die der imaginären. Für die tangentialen Proben ist es entgegengesetzt, allerdings wurde die Steigung der imaginären Leitfähigkeit des ersten Versuchs aufgrund der sehr schlechten Anpassung nicht berücksichtigt. Signifikante Unterschiede konnten jedoch nicht beobachtet werden.

	n_1	ν_1	n_2	ν_2	n_3	ν_3	n	ν
Axial	1,65	1,14	1,36	0,97	1,80	1,90	1,60	1,34
Radial	1,46	1,14	1,20	0,92	1,10	1,15	1,25	1,07
Tangential	2,02	–	2,35	3,30	1,84	2,09	2,07	2,70

Tabelle 5.3: Anstiege der reellen (n) und imaginären (ν) Leitfähigkeiten für die Entsättigungsmessungen.

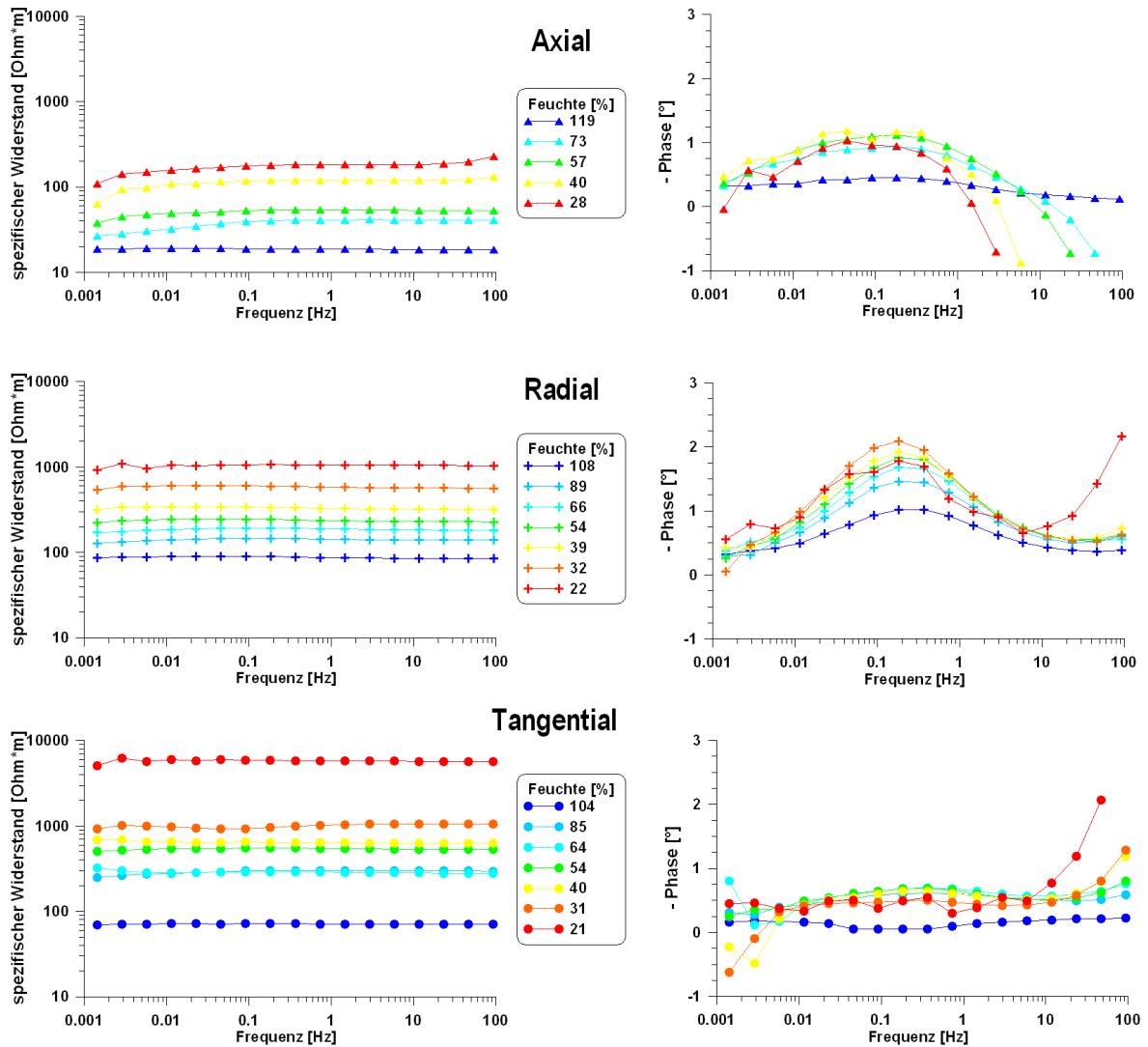


Abbildung 5.7: Spektren des ersten Entsättigungsversuchs. Links sind die spezifischen Widerstände gegen die Frequenz in Abhängigkeit von der Orientierung aufgetragen. Mit abnehmender Sättigung steigt der spezifische Widerstand. In den rechts abgebildeten Phasendarstellungen ist ebenfalls eine Zunahme des Phaseneffektes mit abnehmender Sättigung zu beobachten.

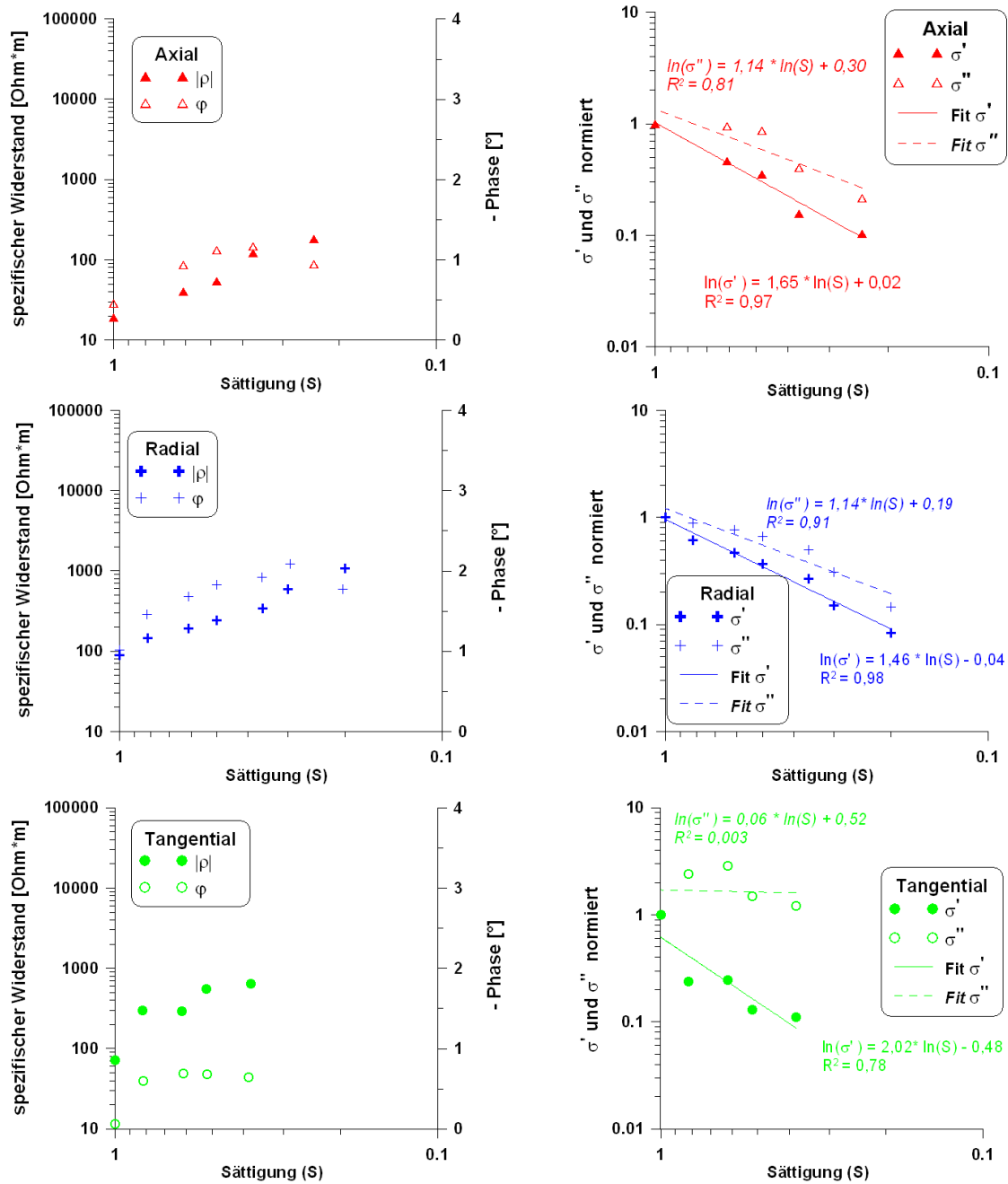
Versuchsreihe 1

Abbildung 5.8: Entsättigungsversuch 1 an Eichenkernholz. **Links:** Spezifischer Widerstand und Phase für $f = 0,183$ Hz aufgetragen über die Sättigung für axiale, radiale und tangentiale Proben. **Rechts:** Normierte reelle und imaginäre Leitfähigkeiten als Funktion der Sättigung.

Versuchsreihe 2

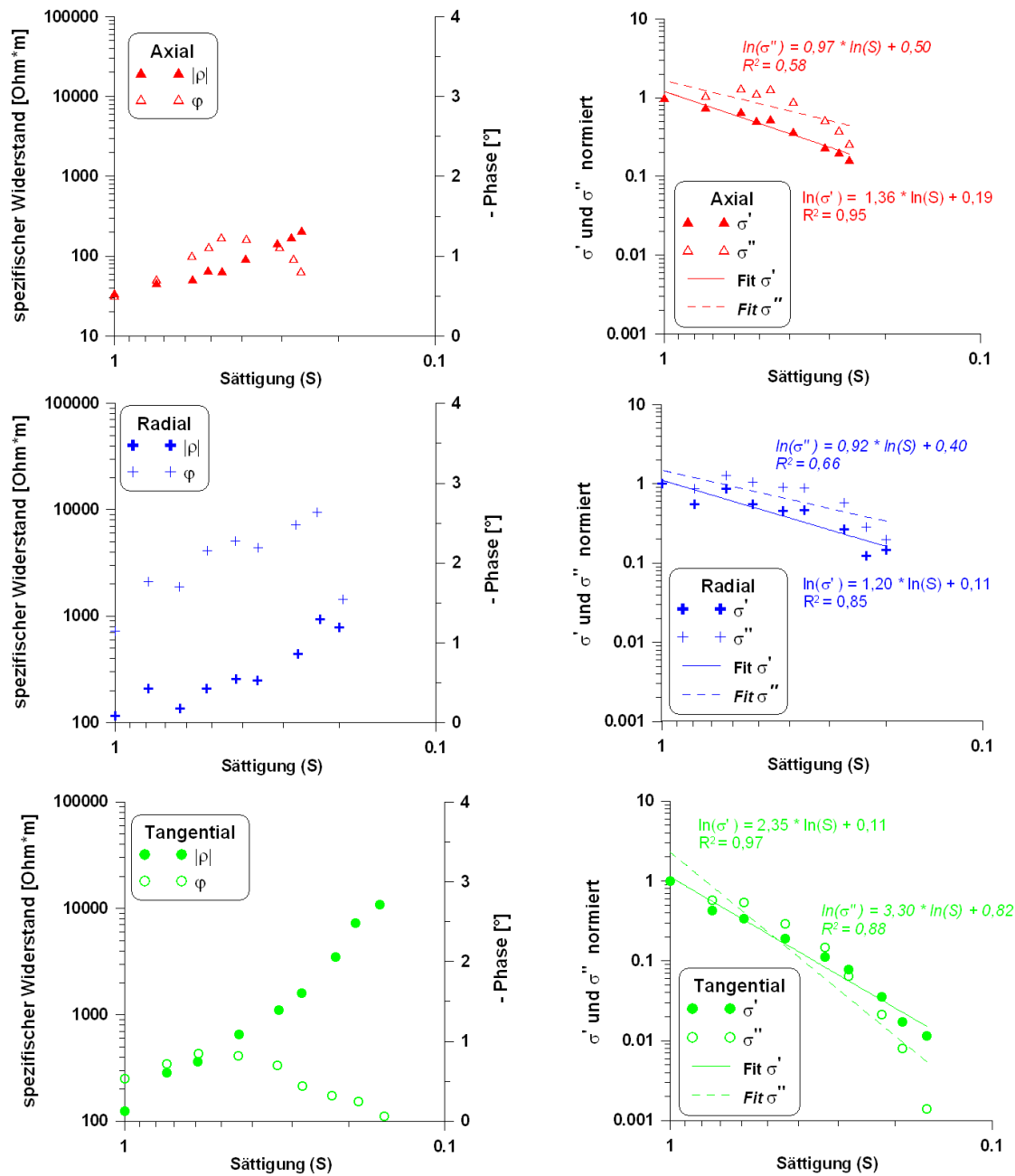


Abbildung 5.9: Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase (links) sowie der normierten reellen und imaginären Leitfähigkeit (rechts) für den Entsättigungsversuch 2.

Versuchsreihe 3

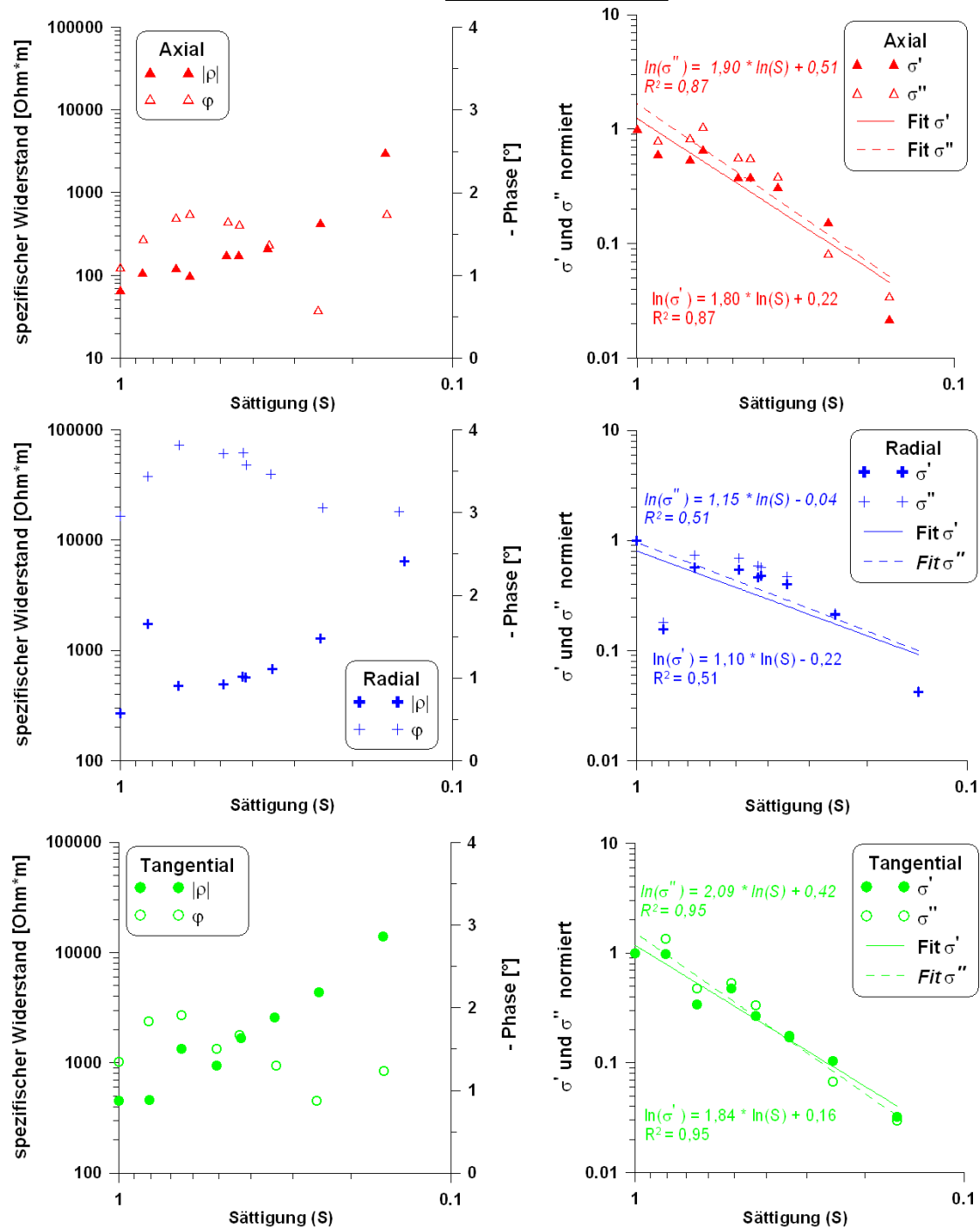


Abbildung 5.10: Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase (links) sowie der normierten reellen und imaginären Leitfähigkeit (rechts) für Entsättigungsversuch 3.

5.3 Laborlangzeitversuche mit Pilzbefall

Zur Interpretation von Tomogrammen des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung an pilzbefallenen Bäumen müssen die Auswirkungen von Pilzbefall auf das Widerstandsverhalten bekannt sein. Deshalb wurde eine einjährige Studie angelegt, in der Eichenkernholzproben in verschiedenen Inkubationsstadien untersucht wurden. Dazu wurden die kernholzzerstörenden Pilze *Daedalea quercina* (Eichenwirrling) und *Laetiporus sulphureus* (Schwefelporling) ausgesucht, da sie an heimischen Eichenarten anzutreffen sind.

5.3.1 Eichenwirrling (*Daedalea quercina*)

Daedalea quercina

Der Eichenwirrling gehört zur Gruppe der Basidiomyceten. Er tritt weltweit auf und ist in Nordeuropa vorwiegend an Eichen zu finden (*Schmidt* (2006)). Er zerstört die Faserstruktur des Holzes und befällt vorzugsweise Kernholz, aber auch Splintholz. Im Gegensatz zum Schwefelporling (Kap. 5.3.2) breitet er sich langsamer aus und bleibt über längere Zeit lokal innerhalb des Baumes begrenzt. Er tritt nicht nur an stehenden Bäumen sondern auch an verbautem/abgestorbenem Holz auf. Der von außen sichtbare Fruchtkörper besiedelt meist den oberen Stamm bzw. Astungswunden. Er ist konsolenartig (bis 30 cm Ausdehnung, siehe Abb. 5.28), graubraun mit Poren auf der Unterseite, die labyrinthartig angeordnet sind. Ist der Fruchtkörper sichtbar, ist das dahinter liegende Holz bereits massiv angegriffen und zerstört.

Probenvorbereitung

Für den Versuch wurden 28 axiale und 30 radiale Proben aus zwei gesunden Eichenkernholzstücken geschnitten. Die Proben wurden darrgetrocknet, gewogen und sterilisiert. Jeweils zwei axiale und radiale Proben wurden anschließend in destilliertem Wasser gelagert, vollgesättigt und dienten als Vergleichsproben. Der Pilz wurde in 54 einzelne, geschlossene Petrischalen auf eine Agar-Malz-Lösung gesetzt. Nach dreiwöchigem Pilzwachstum auf der Nährstofflösung wurden die Proben in jeweils eine Petrischale eingesetzt. Zwei Wochen später hatte der Pilz bereits Hyphen¹ und viel Myzel² auf den Holzproben gebildet. Die erste Entnahme von je zwei axialen und radialen Proben fand sechs Wochen nach dem Einsetzen der Probe auf den Pilz statt. Anschließend wurden ca. alle zwei Wochen je zwei Proben entnommen. Ab Woche 31 vergrößerten sich die Messabstände, um auch langfristige Änderungen beobachten zu können.

Die Holzproben wurden nach der Entnahme aus der Petrischale gewogen und zeitnah in die SIP-Messzelle eingebaut. Die ersten entnommenen Proben passten nicht mehr in die Messzelle. Sie hatten in der Petrischale Wasser aus der Agar-Malz-Lösung gezogen und waren aufgequollen. Deshalb musste sie vor der Messung geschliffen werden. Dies trat vorwiegend bei axialen Proben auf. Der Großteil der später entnommenen Proben (ca. ab Inkubationswoche 31) war stark ausgetrocknet, weshalb sie vor den SIP-Messungen gesättigt werden mussten. Damit änderte sich jedoch nicht nur der

¹Hyphen = mikroskopisch kleine Pilzfäden

²Myzel = Gesamtheit der Hyphen und eigentlicher Pilzkörper

spezifische Widerstand sondern auch die Phase (vgl. Kapitel 5.2). Daher werden die Daten dieser Proben im Folgenden nur zum Teil berücksichtigt.

Nach den SIP-Messungen wurden die Proben erneut darrgetrocknet, um den durch den Pilz verursachten Masseverlust zu berechnen. Anschließend wurde an ausgewählten Proben mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie die Bestimmung der Poreneingangsdurchmesser durchgeführt. Mikroskopische Fotos wurden ebenfalls aufgenommen.

Messungen

In Abbildung 5.11 sind für die axialen (rote Symbole) und radialen Proben (blaue Symbole) die prozentuale Abnahme des Darrgewichtes über die Inkubationszeit sowie die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme aufgetragen.

Dabei spiegelt die Abnahme des Darrgewichtes den Grad des Abbaus durch den Pilz wider. Bei den axialen Proben ist kein klarer Trend erkennbar, hingegen steigt bei den radialen Proben mit zunehmender Inkubationszeit die prozentuale Abnahme des Darrgewichtes. Dies geschieht linear bis ungefähr zur Woche 20. Darüber hinaus liegen sie, abgesehen von zwei Ausreißern, zwischen 20 und 30 %.

Die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Pilzentnahme aus der Petrischale liegt zu Beginn der Messungen zwischen 60 und 100 % für die axialen Proben, bzw. zwischen 90 und 110 % für die radialen Proben. Ab einer Inkubationszeit von ca. 20 Wochen nimmt die Holzfeuchte ab. Über die 30. Inkubationswoche hinaus schwankt die Holzfeuchte um 15 %.

Holzphysiologisch lässt sich das Verhalten durch den Feuchtebedarf des Pilzes erklären. Der Pilz zieht aus dem Agar-Malz-Gel und aus der Luft Feuchtigkeit, die er für den Stoffwechsel benötigt. Steht dem Pilz nicht mehr ausreichend Feuchte zum Stoffwechsel zur Verfügung oder sind die pilzrelevanten Substanzen abgebaut, trocknet das Holz aus und passt sich der Umgebungsfeuchte an. Ein größerer Substanzabbau (Abnahme des Darrgewichtes) findet dann nicht mehr statt.

In Abbildung 5.12 sind für ausgewählte axiale und radiale Holzproben die Spektren des spezifischen Widerstands und der Phase dargestellt. Dabei nimmt für beide Orientierungen der spezifische Widerstand zu Beginn ab. Ab ungefähr Inkubationswoche 25 setzt jedoch für die axialen Proben die Austrocknung ein. Die Holzproben trocknen sehr schnell und es lässt sich eine eindeutige Abnahme des Phaseneffektes mit zunehmender Inkubationszeit erkennen. Diese Abnahme setzt sich auch über die 25. Woche fort.

Bei den radialen Proben ist derselbe Effekt zu beobachten. Allerdings setzt die Austrocknung schon eher (Inkubationswoche 22) ein. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Orientierungen ist die schon in Kapitel 5.1 gezeigte Differenz im spezifischen Widerstand sowie die unterschiedliche Position des Phasenmaximums im Frequenzspektrum.

Einen Überblick über den spezifischen Widerstand, die Phase, die reellen und imaginären Leitfähigkeitsanteile in Abhängigkeit von der Inkubationszeit sind für die axialen Proben in Abbildung 5.13 und für die radialen Proben in Abbildung 5.14 bei der Frequenz des jeweiligen Phasenmaximums dargestellt (axial: $f = 0,01 \text{ Hz}$, radial: $f = 0,183 \text{ Hz}$).

Bei den axialen Proben verringert sich der spezifische Widerstand in den ersten 25

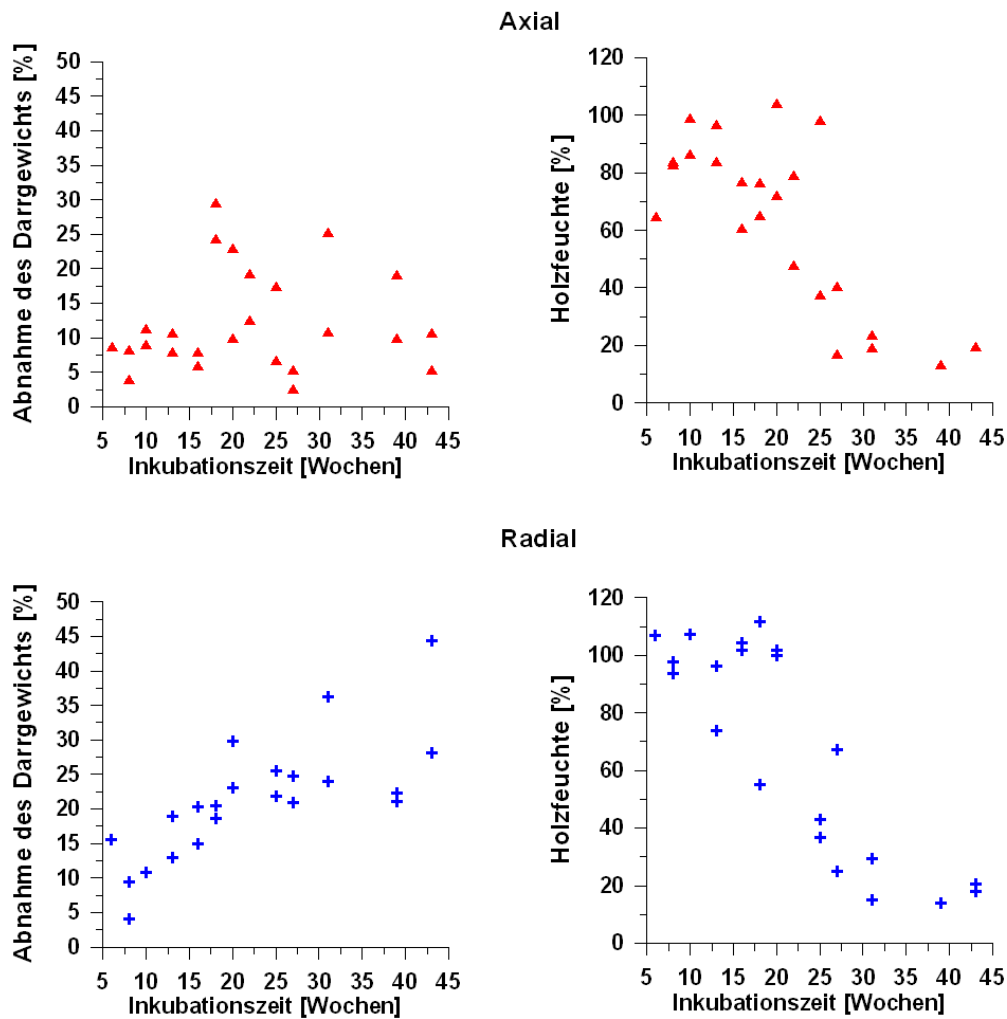


Abbildung 5.11: Abnahme des Darrgewichts (links) und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme (rechts) aufgetragen gegen die Inkubationszeit für die axialen (oben) und radialen (unten) Proben. Während bei den axialen Proben keine Tendenz bei der Abnahme des Darrgewichts über die Zeit erkennbar ist, nimmt sie für die radialen Proben beinahe linear zu. Die Holzfeuchte nimmt in Abhängigkeit von der Inkubationszeit ab.

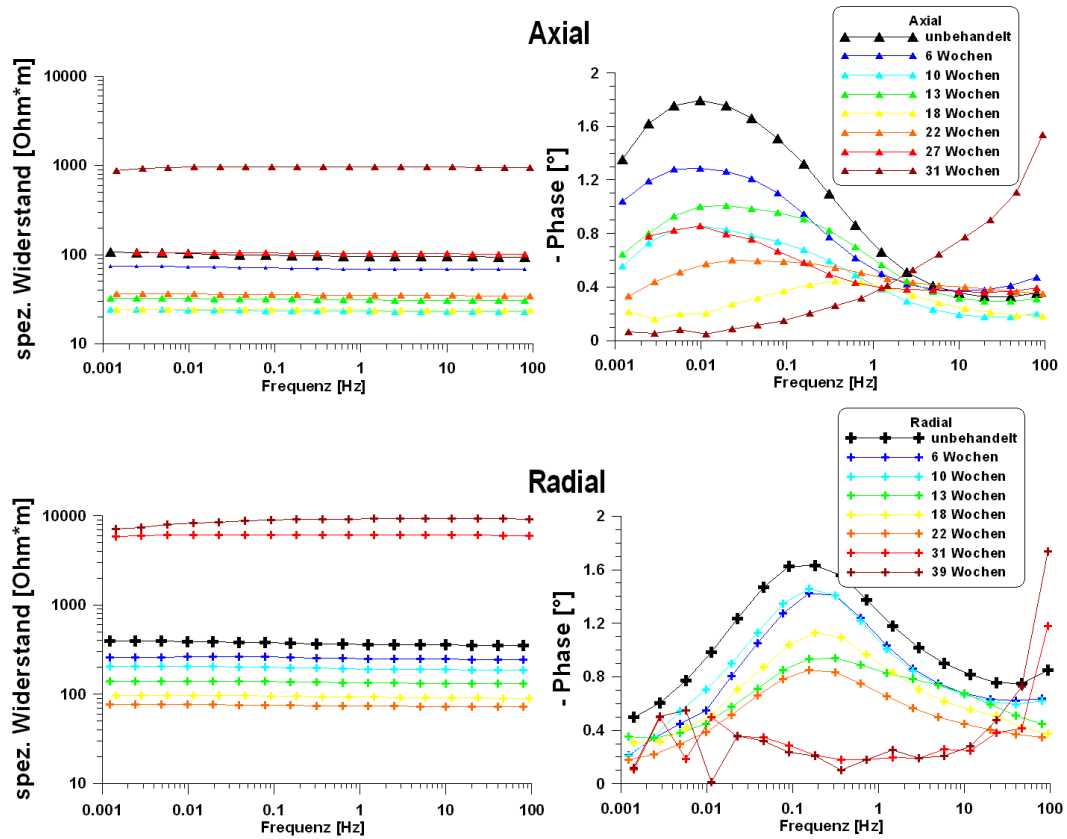


Abbildung 5.12: Spektren ausgewählter Holzproben in Abhängigkeit von der Inkubationszeit für axiale (oben) und radiale Proben. Der spezifische Widerstand nimmt zunächst ab. Später steigt er schnell an. Die Probe trocknet aus. In der Phasendarstellung ist eine deutliche Abnahme mit zunehmender Inkubationszeit zu sehen.

Inkubationswochen von ca. 100 Ωm auf ca. 20 Ωm . Danach steigt er zügig auf über 100 000 Ωm an. Genauso verhält es sich für die reellen und imaginären Leitfähigkeitsanteile. Ab Inkubationswoche 25 nehmen beide Leitfähigkeitsanteile zügig über drei Dekaden ab. Demgegenüber steht die Phase, die auch über Inkubationswoche 25 hinweg deutlich abnimmt. Bei ihr ist kein Wendepunkt zu sehen. Der Phaseneffekt verringert sich mit zunehmender Inkubationszeit.

Für die radialen Proben (Abb. 5.14) ergibt sich ein ähnliches Bild. Ab einer Inkubationszeit von 22 Wochen sind für den spezifischen Widerstand und die Anteile der reellen und imaginären Leitfähigkeit eine Trendumkehr zu beobachten. Die Phase nimmt jedoch weiter ab.

Gravierende Unterschiede zwischen dem Verhalten von axialen und radialen Proben bestehen nicht. Das Phasenmaximum der radialen Proben liegt wie in allen vorherigen Versuchen auch bei höheren Frequenzen ($f=0,183\text{ Hz}$) als das der axialen Proben ($f=0,01\text{ Hz}$). Des Weiteren sind die spezifischen Widerstandswerte der radialen Proben größer. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.1 (Anisotropieversuch).

Die Austrocknung setzte bei den radialen Proben drei Wochen früher ein als bei den axialen Proben. Entweder findet der Pilz bei den axialen Proben mehr Stoffe zum Abbauen oder die Feuchtigkeit hält sich in den axialen Proben länger als in den radialen. Letzteres konnte bereits bei den Entsättigungsversuchen (Kapitel 5.2) beobachtet werden. So trockneten die radialen Proben immer schneller aus als die axialen. Das ist vermutlich auf die Anzahl der angeschnittenen Holzzellen zurückzuführen. Bei der Entnahme der radialen Proben werden mehr Holzzellen angeschnitten, da ein Großteil der Zellen im Holz axial verläuft. Dadurch kann es zu einer schnelleren Austrocknung der Holzproben kommen.

In den Abbildungen 5.15 und 5.16 wurden die SIP-Daten zusätzlich über die Abnahme des Darrgewichts und über die Holzfeuchte aufgetragen.

Der spezifische Widerstand nimmt tendenziell mit größerer Abnahme des Darrgewichts für die axialen Proben ab. Bei den radialen Proben scheint hingegen der spezifische Widerstand konstant (Werte zwischen 100 Ωm und 250 Ωm) mit dem Holzabbau einherzugehen. Allerdings gibt es auch Daten mit höheren spezifischen Widerständen bei einer hohen Abnahme des Darrgewichts ($> 20\%$).

Die Phase nimmt tendenziell ebenfalls mit zunehmenden Holzabbau (Abnahme des Darrgewichtes) für die axialen Proben ab (Abb. 5.15, rechts oben). Bei den radialen Proben (blaue Symbole) setzt die Minderung erst ab einer 15 %-igen Abnahme des Darrgewichts ein.

In den Leitfähigkeiten sind die Tendenzen für die axialen Proben noch besser zu sehen. So steigt die reelle Leitfähigkeit mit zunehmenden Holzabbau. Für die radialen Proben ändert sich die reelle Leitfähigkeit kaum. Die imaginären Leitfähigkeiten nehmen für die axialen Proben tendenziell mit Verringerung des Darrgewichts ab. Für die radialen Proben ist kein Trend erkennbar.

Unterschiede zwischen radialen und axialen Proben sind hier offensichtlich. Während bei den axialen Proben eine Zerstörung der Zellstruktur (bei zunehmenden Holzabbau)

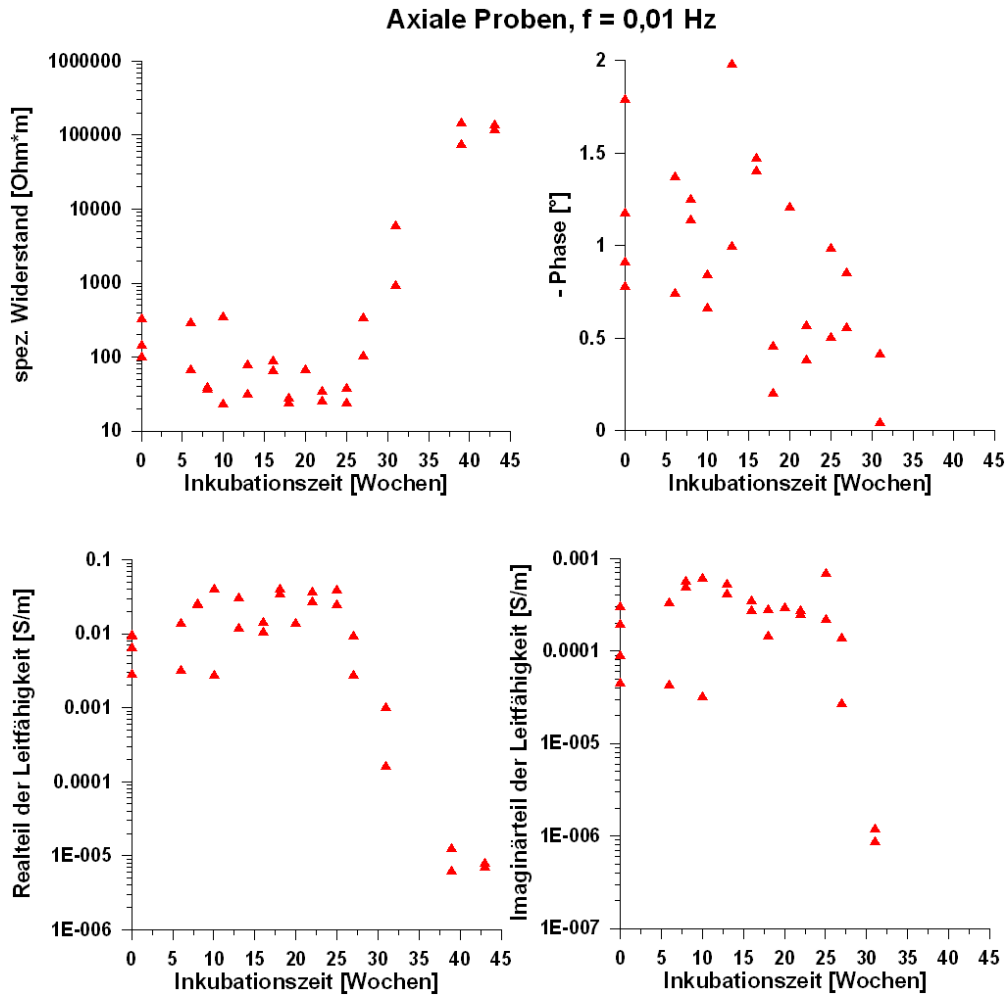


Abbildung 5.13: Spezifischer Widerstand, Phase, reelle und imaginäre Leitfähigkeitsanteile aufgetragen über die Inkubationszeit bei der Frequenz des Phasenmaximums ($f = 0,01$ Hz) für die axialen Proben. Ab einer Inkubationszeit von 25 Wochen ist eine Trendumkehr zu beobachten.

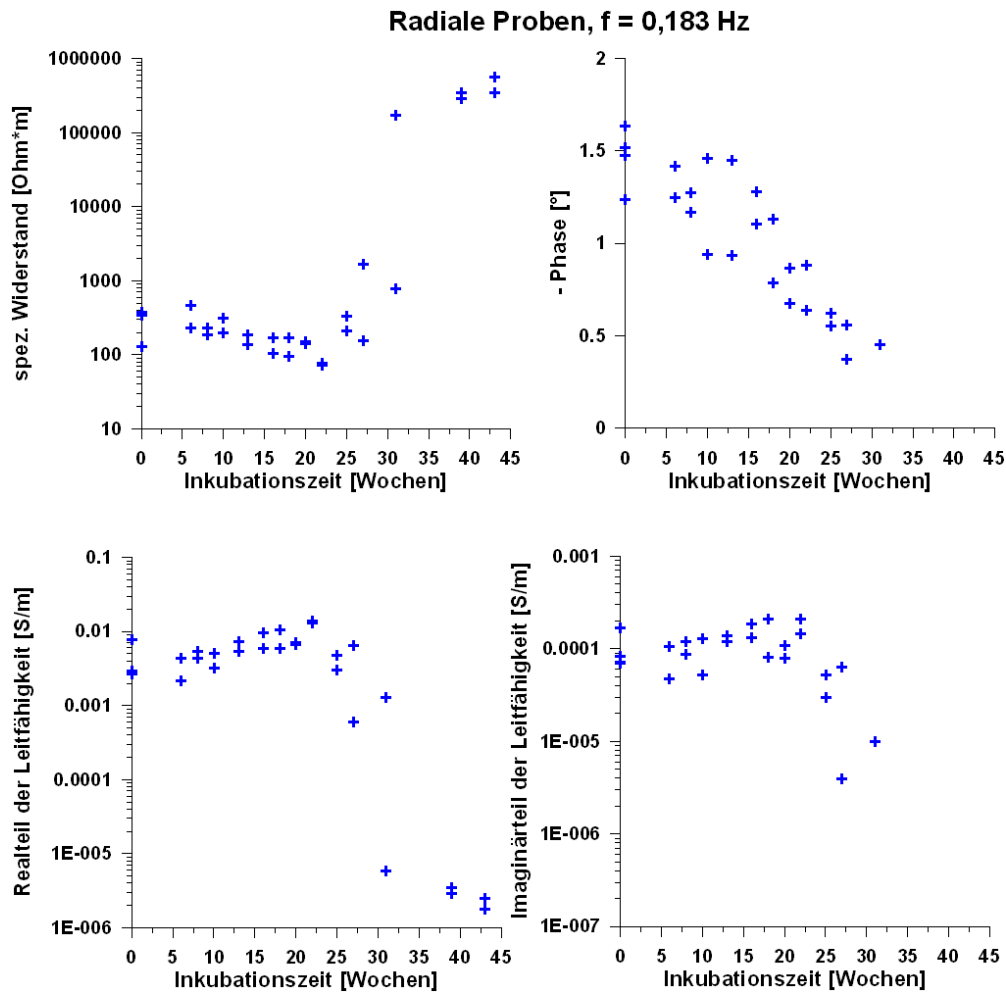


Abbildung 5.14: Spezifischer Widerstand, Phase, reelle und imaginäre Leitfähigkeitsanteile aufgetragen über die Inkubationszeit bei der Frequenz des Phasenmaximums ($f = 0,183 \text{ Hz}$) für die radialen Proben. Ähnlich den axialen Proben ist ab einer Inkubationszeit von 22 Wochen eine Trendumkehr für den spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeiten zu beobachten. Die Phase nimmt erneut mit der Inkubationszeit ab.

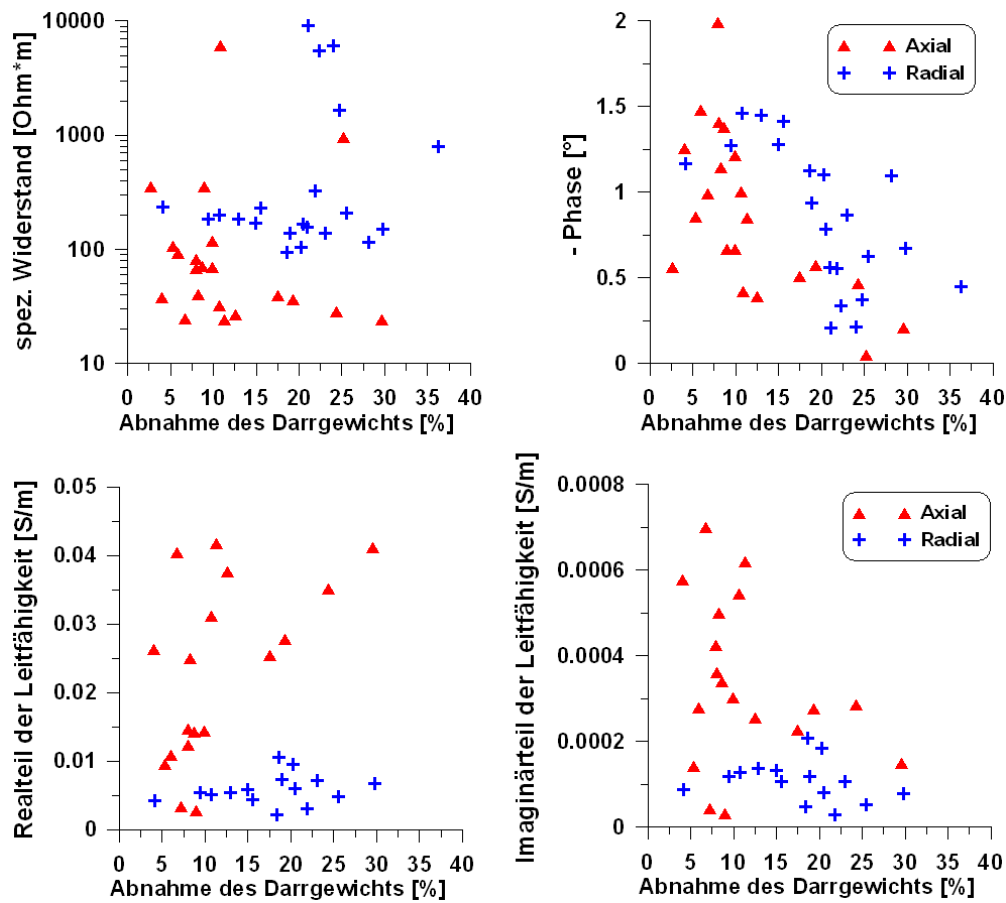


Abbildung 5.15: Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit aufgetragen über die Abnahme des Darrgewichtes für axiale (rot) und radiale (blau) Proben. Die axialen Proben zeigen mit zunehmenden Holzabbau (Änderung des Darrgewichtes) eine Verringerung der Phase und des spezifischen Widerstands.

zu einer Verringerung der Phase und des spezifischen Widerstands führt (bzw. zu einem Anstieg des Realteils und einer Abnahme des Imaginärteils der Leitfähigkeit), scheinen bis zu einem Abbaugrad von 15 - 20 % spezifischer Widerstand und Phase der radialen Proben relativ unbeeinflusst von der Zerstörung der Holzstruktur zu sein. Bei einem höheren Abbaugrad ist ebenfalls eine Abnahme der Phase zu sehen. Beim spezifischen Widerstand ist jedoch kein Trend erkennbar. Die Leitfähigkeitsanteile der radialen Proben bleiben gegenüber den axialen Proben relativ konstant.

In Abbildung 5.16 sind spezifischer Widerstand, Phase und die Leitfähigkeitsanteile über die Holzfeuchte aufgetragen. Der spezifische Widerstand der axialen Proben nimmt zunächst bis zu einer Holzfeuchte von ca. 50 % stark ab. Darüber hinaus pendeln sich die Werte zwischen 20 Ωm und 80 Ωm ein. Die radialen Proben verhalten sich ähnlich. Auch hier ist bis zu einer Holzfeuchte von ca. 50 % ein starker Abfall zu beobachten. Höhere Holzfeuchten haben dagegen keinen Einfluss mehr auf den spezifischen Widerstand. Dieser schwankt dann für die radialen Proben zwischen 100 Ωm und 200 Ωm .

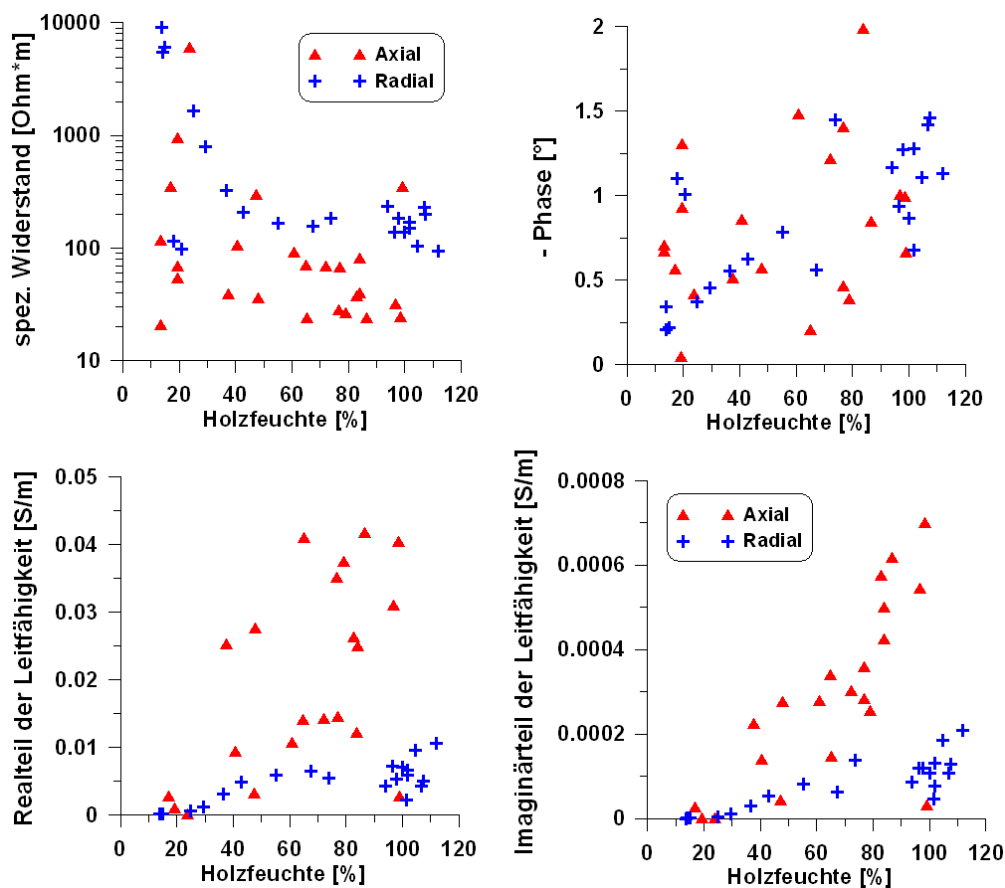


Abbildung 5.16: Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit aufgetragen über die Holzfeuchte für axiale und radiale Proben. Die Phase nimmt tendenziell mit steigender Holzfeuchte zu. Der spezifische Widerstand nimmt bis zu einer Holzfeuchte von ca. 50 % stark ab. Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit nehmen für beide Orientierungen unterschiedlich stark zu.

Bei den radialen Proben ist eine tendenzielle Zunahme der Phase mit steigender Holzfeuchte zu beobachten. Diese Tendenz ist für die axialen Proben nicht zu sehen. Sowohl für die reelle als auch für die imaginäre Leitfähigkeit ist hingegen ein Anstieg mit der Holzfeuchte zu beobachten. Dabei wirkt sich die Holzfeuchte stärker auf die axialen Proben aus als auf die radialen.

Spezifischer Widerstand, reelle und imaginäre Leitfähigkeit verhalten sich damit ähnlich den Ergebnissen des Entsättigungsversuchs (Kapitel 5.2). In der Phasenverschiebung gibt es jedoch Unterschiede bei den radialen Proben. Für Holzfeuchten unter ca. 50 % gibt es ein Anstieg der Phase mit zunehmender Holzfeuchte, parallel zu den Proben des Entsättigungsversuchs. Bei höheren Holzfeuchten hingegen ist keine Abnahme der Phase, analog zu den Entsättigungsversuchen, erkennbar. Stattdessen schwanken die Phasenwerte zwischen $-0,7^\circ$ und $-1,5^\circ$ bei Holzfeuchten um 100 %.

Nach den SIP-Messungen wurden an ausgewählten Proben die Bestimmung der Eingangsdurchmesser der Poren vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.17 für axiale (links) und radiale (rechts) Proben zu sehen, sowie im Anhang (B.6 bis B.9) aus-

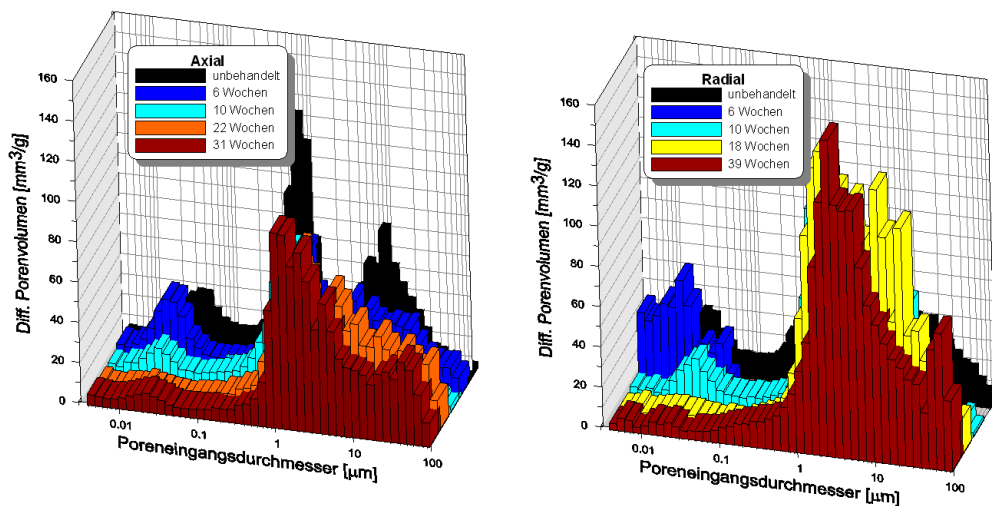


Abbildung 5.17: Dreidimensional Darstellung der Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für ausgewählte axiale (links) und radiale Proben. Mit zunehmender Inkubationszeit wird aus der trimodalen eine beinahe unimodale Verteilung.

fürlich. Die unbefallenen Proben weisen eine trimodale Verteilung der Poreneingangsdurchmesser auf. Die häufigsten Eingangsdurchmesser der Poren liegen um $0,03\ \mu\text{m}$, $0,7\ \mu\text{m}$ und $9,5\ \mu\text{m}$. Mit zunehmender Inkubationszeit verschwinden die kleinsten Poreneingangsdurchmesser und die Verteilung wird bi- bis unimodal. Die häufigsten Eingangsdurchmesser der Poren liegen dann zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $3\ \mu\text{m}$.

Die Porositäten der Proben steigen mit zunehmender Inkubationszeit für die axialen und noch stärker für die radialen Proben an (siehe Abbildung im Anhang B.10).

In Abbildung 5.18 ist der dominante Poreneingangsdurchmesser mit dem größten Porenvolumen (i. d. R. um $0,7\ \mu\text{m}$ - $1\ \mu\text{m}$) und der Anteil des Porenvolumens beim dominanten Poreneingangsdurchmesser über die Inkubationszeit aufgetragen. Gerade für die radialen Proben ist eine deutliche Erhöhung des dominanten Poreneingangsdurchmessers mit zunehmender Inkubationszeit zu beobachten. Die Poreneingangsdurchmesser der axialen Proben nehmen ebenfalls zu, allerdings mit geringerem Anstieg. Auch der Anteil des Porenvolumens (Abbildung 5.18 rechts) steigt mit der Inkubationszeit an. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Pilz die Zellstruktur deutlich verändert. Kleinporige Zellen bzw. die kleinporigen Zelleingänge werden zerstört und übrig bleibt ein höherer Anteil von größeren Zellstrukturen.

Aus den IP-Spektren dieser ausgewählten Proben wurde ebenfalls die mittlere Relaxationszeit durch Debye-Zerlegung nach *Nordsiek und Weller* (2008) berechnet. In Abbildung 5.19 ist die auf den Anteil des Gleichstroms normierte Aufladbarkeit (links) und die mittlere Relaxationszeit (rechts) aufgetragen gegen die Inkubationszeit. Dabei zeigt sich, dass mit zunehmendem Pilzabbau die Aufladbarkeit sinkt. Infiziertes Holz ist demnach nicht mehr so stark polarisierbar wie gesundes Holz.

Die mittlere Relaxationszeit sinkt ebenfalls mit der Inkubationszeit. Daraus lässt sich schließen, dass es einen Zusammenhang zwischen der mittleren Relaxationszeit und der Porenradienverteilung gibt, welcher es möglich machen könnte, aus den IP-Spektren

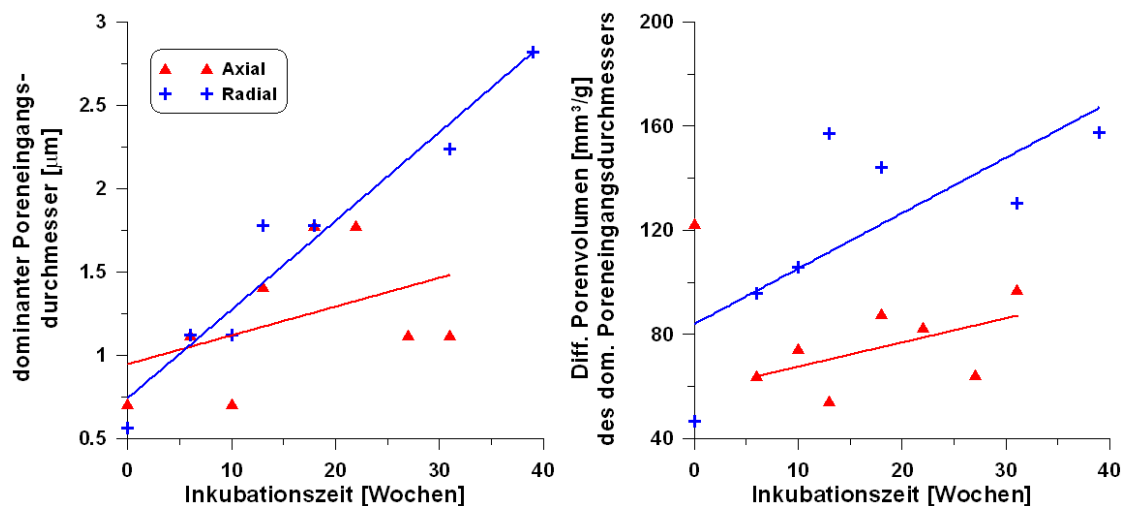


Abbildung 5.18: Dominanter Poreneingangsdurchmesser (links) und zugehöriges differentielles Porenvolumen (rechts) aufgetragen gegen die Inkubationszeit. Beides steigt mit zunehmendem Holzabbau an.

Rückschlüsse über den Holzabbau zu ziehen.

Die Darstellungen des dominanten Poreneingangsdurchmesser über die mittlere Relaxationszeit und über die Ungleichförmigkeit sind zusätzlich im Anhang (Abbildung B.11) zu sehen.

Mikroskopische Aufnahmen an den unbefallenen und den am stärksten befallenen Proben sind in Abbildung 5.20 zu sehen. Bild a) und b) zeigen einen radialen Schnitt der axialen Proben in 20-facher Vergrößerung. Deutlich ist bei der unbefallenen Probe (a) der Aufbau des Holzes erkennbar. Die großporigen, wasserleitenden Lumen (1) wechseln sich mit den kleineren Holzzellen ab. Die in der Literatur angegebenen Größenordnungen der Lumen von gesunder Eiche (*Grosser* (1977)) sind ähnlich den hier sichtbaren Lumen (um $200\ \mu\text{m}$). Bei der stark befallenen Probe (b) erscheint der Aufbau unstrukturierter. Bedingt durch den starken Holzabbau, wurde die Probe beim Schneiden der zu mikroskopierenden Stücke zusammengeschoben. Die Strukturen erscheinen verwaschen und ungeordnet.

Die axialen Schnitte der radialen Proben sind mit 40-facher Auflösung in Abbildung 5.20 Bild c) und d) dargestellt. Auch hier erscheint die unbefallene Probe (c) strukturierter als die befallene Probe (d). Die Zellen der radial verlaufenden Holzstrahlen (2) erscheinen in d) leicht verwaschen. Die Tüpfel (3) sind deutlich zu erkennen. Sie weisen Durchmesser von $0,7\ \mu\text{m}$ auf. Dies entspricht in etwa der gemessenen dominante Poreneingangsdurchmesser um $1\ \mu\text{m}$.

Der pilzverursachte Abbau ist prinzipiell in den Aufnahmen erkennbar. Die Zellstruktur löst sich auf. Allerdings kann es auch im Rahmen der Darrtrocknung zu Spannungsrisen im Holz kommen, die eine ähnlich Zerstörung hervorrufen. Da jedoch alle Proben unter denselben Bedingungen darrgetrocknet wurden, können die in dem Vergleich gezeigten Fotos als Indiz eines Pilzabbaus gelten. Weitere mikroskopische Aufnahmen sind im Anhang (Abb. B.12, Abb. B.13) zu sehen.

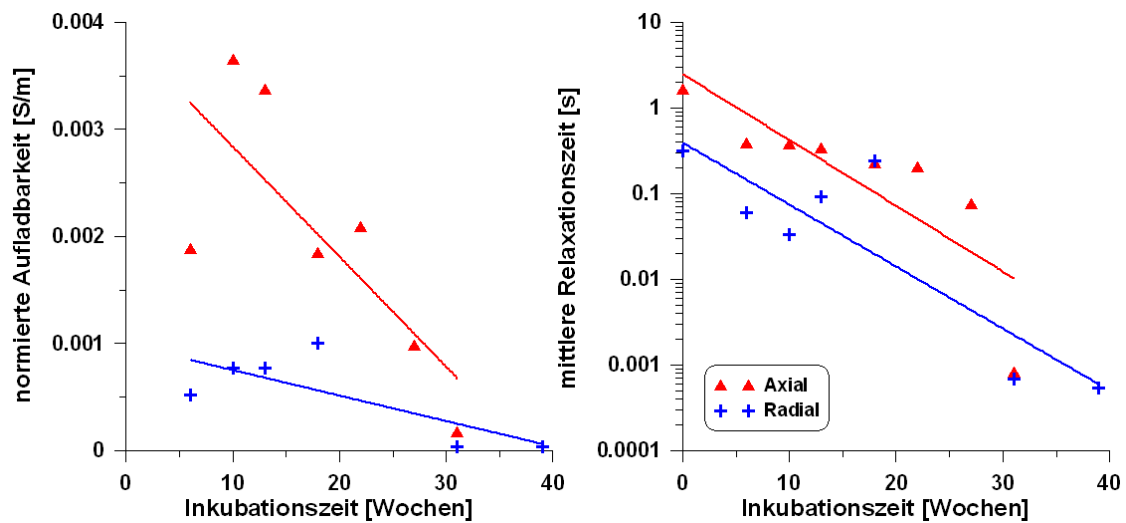


Abbildung 5.19: Normierte Aufladbarkeit (links) und mittlere Relaxationszeit aufgetragen über die Inkubationszeit. Deutlich ist mit zunehmender Inkubationszeit ein Abfall der Aufladbarkeit und der mittleren Relaxationszeit zu sehen.

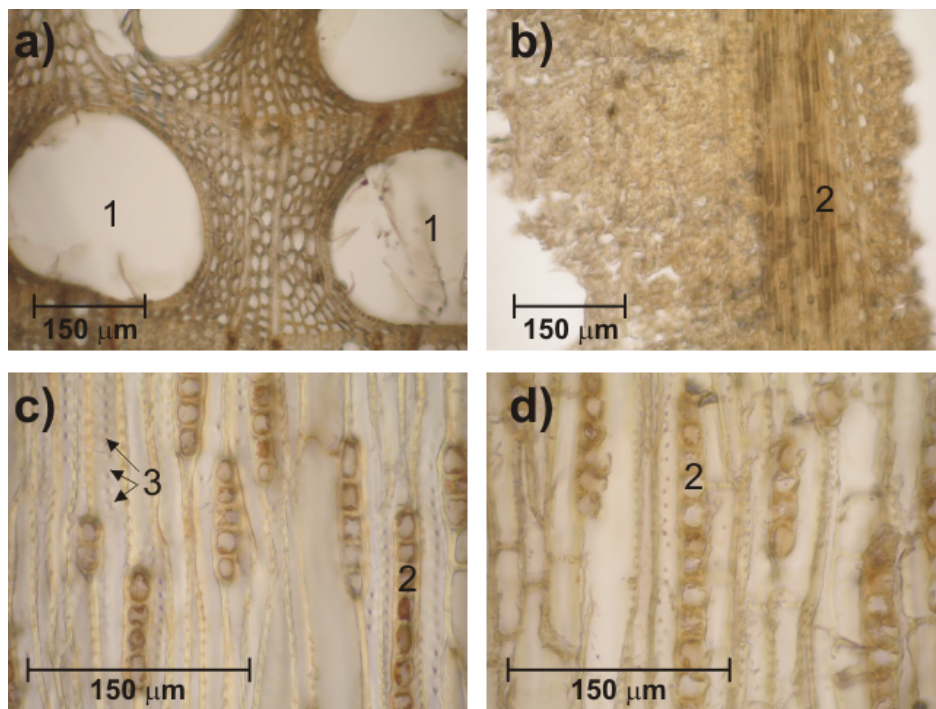


Abbildung 5.20: Mikroskopische Aufnahmen der befallenen und unbefallenen Proben. a) radialer Schnitt der axialen, unbefallenen Probe, 20-fache Vergrößerung. b) radialer Schnitt der axialen, befallenen Probe, 20-fache Vergrößerung. c) axialer Schnitt der radialen, unbefallenen Probe, 40-fache Vergrößerung. d) axialer Schnitt der radialen, befallenen Probe, 40-fache Vergrößerung. 1 - Lumen (große Poren), 2 - Holzstrahlen, 3 - Tüpfel (Porenverbindungen).

5.3.2 Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*)

Laetiporus sulphureus

Der Schwefelporling ist einer der am weitesten verbreiteten braunfäuleerregenden Pilze (*Schwarze et al.* (1999)). Er kann Laub- und Nadelbäume im stehenden Zustand besiedeln (*Schwarze* (1994), *Schmidt* (2006)). Er tritt bevorzugt nach Rindenverletzungen, Ästungsschnitten oder an verletzten Wurzeln auf und baut das Holz relativ langsam ab. Er kann sowohl im lebenden, als auch an verbaute Holz auftreten und verursacht eine intensive Würfelbruchfäule im Kernholz. An Stieleiche zersetzt der Schwefelporling im Anfangsstadium die Fasertracheiden³ des Frühholzes und die mittlere Sekundärwand. Im Spätholz bilden sich Spalten in der Sekundärwand. In den Schwundrissen werden lederartige Myzelmatten gebildet. Die Hyphen verbreiten sich über die Tüpfelverbindungen der Zellen, so dass selten die Zellwand direkt abgebaut wird.

Der nach außen sichtbare Fruchtkörper des Schwefelporlings tritt einjährig, vorzugsweise im Sommer/Herbst, am Stamm auf. Die Oberseite ist gelb-rötlich, während die Unterseite schwefelgelbe Poren (Grösse 3 - 4 mm) aufweist. Die Fruchtkörper können eine Größe von 15 - 40 cm haben und sind dachziegelartig übereinander geschichtet. Nach dem Absterben werden sie starr und grau und hinterlassen nach dem Abfallen charakteristische weiße Spuren auf der Borke.

Probenvorbereitung

Für diesen Versuch wurden 28 axiale und 32 radiale Proben geschnitten, darrgetrocknet, sterilisiert und anschließend auf den bereits gewachsenen Pilz in die Petrischale gelegt. Je zwei Proben dienten als Referenz, die unbepilzt untersucht wurden. Aufgrund des soweit sichtbaren, langsameren Pilzwachstums dieser Proben, wurden die ersten Proben erst nach 18 Wochen entnommen. Danach folgten ca. alle vier Wochen weitere Probenentnahmen, je zwei axiale und zwei radiale.

Nach der Entnahme der Proben aus den Petrischalen wurden sie gewogen und in die SIP-Messzelle eingebaut. Die zuerst entnommenen Proben mussten vor Beginn der Messung geschliffen werden, da sie durch die Feuchteaufnahme expandierten und zu groß für die Messzelle waren.

Im Laufe der Messungen stellte sich heraus, dass die Abstände der Probenentnahme zu groß gewählt waren. Der Pilz benötigte mehr Wasser als er aus seiner Umgebung aufnehmen konnte. Deutlich wurde das an der Agar-Malz-Lösung, die sich in der Petrischale befand. Sie wurde durch den Wassermangel löchrig. Infolgedessen mussten die Proben bereits von der fünften Entnahme an gesättigt werden. Dies führte zu deutlichen Veränderungen bei den SIP-Messungen (vgl. auch Kap. 5.2 und 5.3.1). Daher werden bei der Darstellung der Resultate nur die Proben ohne zusätzliche Sättigung dargestellt. Im Anhang sind zusätzlich die Abbildungen aller gemessenen Proben zu sehen (Abbildungen B.14 bis B.16). Im Anschluss an die SIP-Messung wurden die Proben wieder darrgetrocknet, gewogen und die Holzfeuchte bestimmt.

³faserförmige, langgestreckte Zellen.

Messungen

In Abbildung 5.21 sind für alle gemessenen axialen und radialen Proben die Abnahme des Darrgewichts sowie die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Probenentnahme über die Inkubationszeit aufgetragen.

Grundsätzlich ist für die axialen Proben kein klarer Trend bei der Abnahme des Darr-

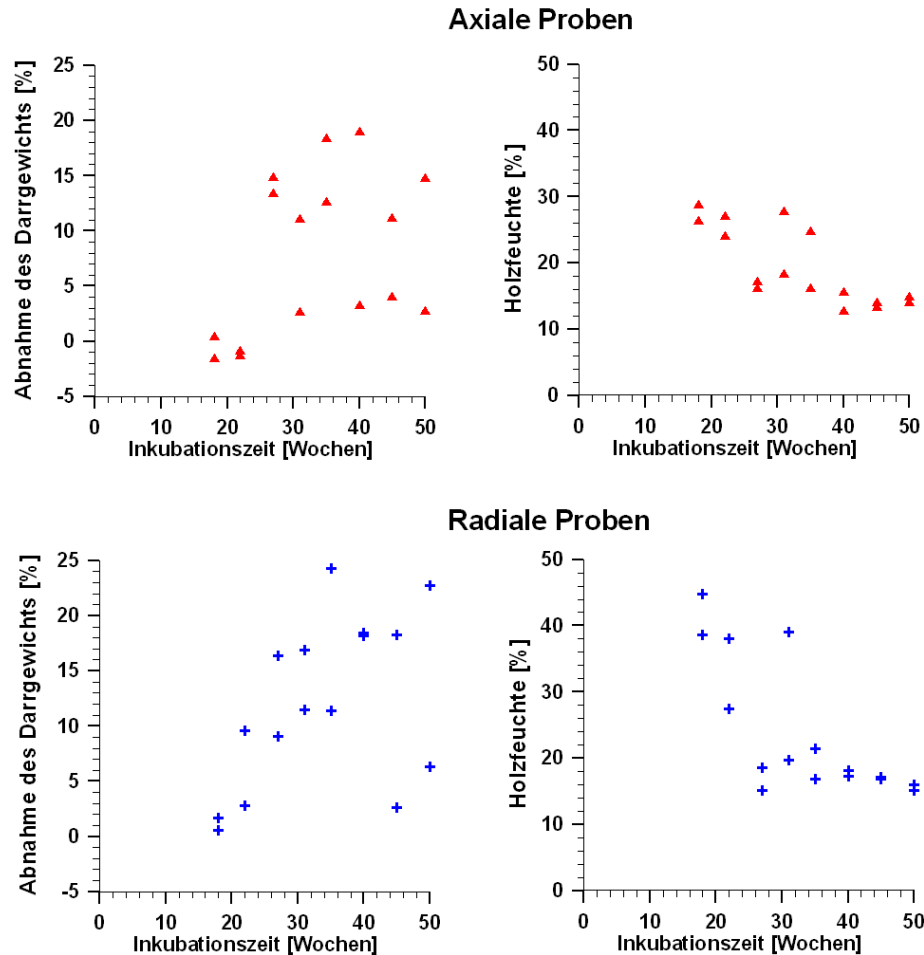


Abbildung 5.21: Versuch mit dem Schwefelporling. Abnahme des Darrgewichts und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme aufgetragen über die Inkubationszeit für die axialen (oben) und radialen (unten) Proben. Tendenziell ist eine Abnahme des Darrgewichts über die Zeit erkennbar. Die Holzfeuchte nimmt zunächst ab, bis sie sich bei ca. 15 % einstellt.

gewichts erkennbar. Auffällig sind die negativen Werte für die Abnahme des Darrgewichts. Das entspricht einer Gewichtszunahme. Das ist physikalisch nicht möglich. Bei diesen Proben sind infolge des Schleifens die Darrgewichte fehlerhaft bestimmt worden. Da die richtigen Werte nicht mehr rekonstruiert werden konnten und die Anzahl der Messdatensätze generell sehr klein ist, wurden diese Messwerte mit dargestellt.

Im Unterschied zu den axialen Proben ist bei den radialen Proben ein Trend erkennbar. Mit zunehmender Inkubationszeit fand ein Abbau statt. Dieser scheint trotz einsetzen-

der Trocknung über die Inkubationswoche 22 hinauszugehen. Jedoch erfolgt keine so große Änderung des Darrgewichts wie bei den Eichenwirrlingproben (Abb. 5.11).

Die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme liegt im Gegensatz zum ersten Versuch bei nur 30 bzw. 50 % (radiale Proben). Zu Beginn sinkt sie mit fortschreitender Inkubationszeit und pegelt sich nach ca. 25 Wochen bei 15 - 20 % ein.

Die Spektren ausgewählter axialer und radialer Proben sind in Abbildung 5.22 dargestellt. Nach anfänglich leichter Abnahme des spezifischen Widerstands setzte die Austrocknung ein (27. Woche) und der spezifische Widerstand nahm zu. Ab der 35. Woche mussten die Proben für die Messung gesättigt werden (gestrichelte Linien), was zu einem deutlichen Abfall im spezifischen Widerstand führte. In der Phase ist eine Abnahme des Phaseeffekts mit zunehmender Inkubationszeit zu beobachten. Ein Sättigung der späteren Proben erhöhte zwar die Phase wieder, erreicht aber nicht mehr die Größe der unbepilzten Proben.

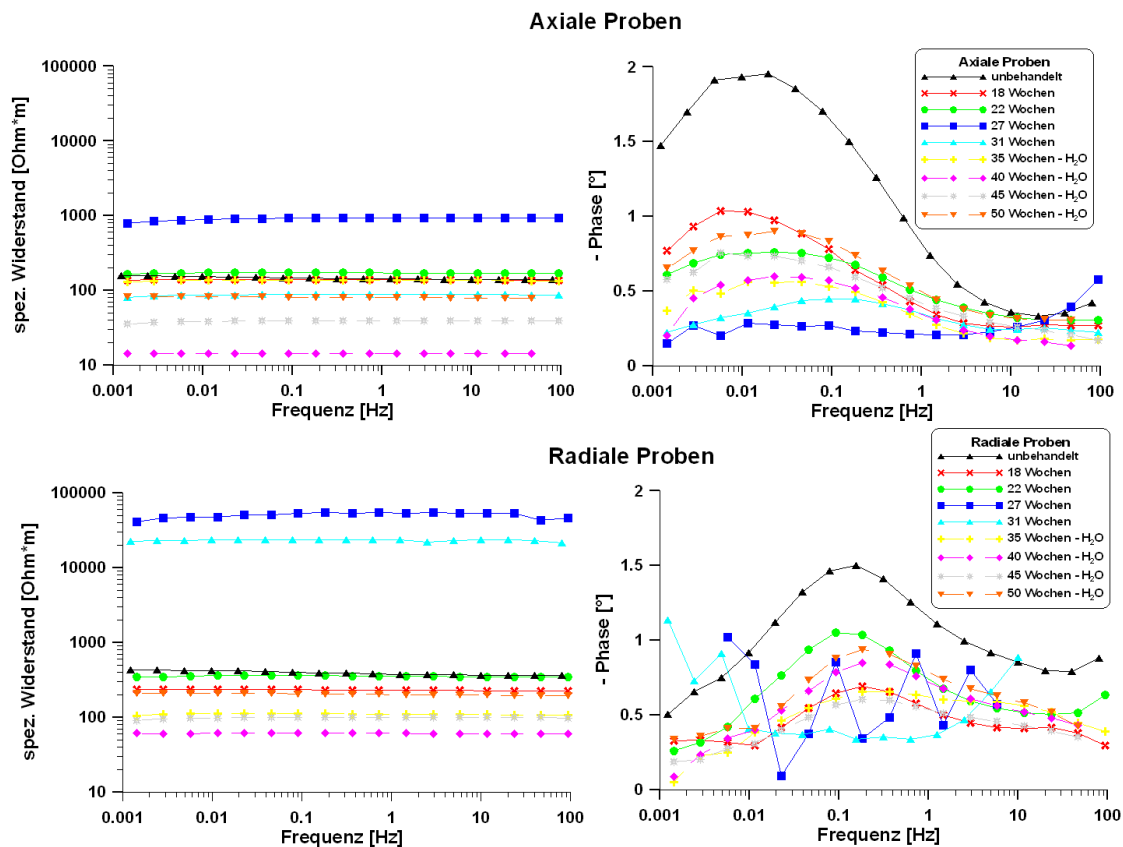


Abbildung 5.22: Versuch mit dem Schwefelporling. IP-Spektren ausgewählter Holzproben in Abhängigkeit von der Inkubationszeit für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Nach kurzzeitiger Abnahme steigt der spezifische Widerstand (links) an. Nach Sättigung (gestrichelte Linien) nimmt er wieder ab. In der Phasendarstellung (rechts) ist eine Abnahme mit zunehmender Inkubationszeit zu sehen. Bei Sättigung nimmt die Phase wieder etwas zu, erreicht aber nicht die Größe der unbefallenen Proben. Die radialen Proben der 27. und 30. Woche sind aufgrund der hohen Übergangswiderstände gestört.

Ein Unterschied zwischen axialen und radialen Proben ist erneut in Größe und Lage des Phasenmaximums im Frequenzspektrum zu erkennen.

Durch die zunehmenden hohen Übergangswiderstände fließt nur ein geringer Strom. Die radialen Proben der Wochen 27 und 30 sind aufgrund der daraus resultierenden, sehr kleinen Messspannung stark verrauscht und fehlerbehaftet. Daher sind die Spektren deutlich gestört.

Die Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase über die Inkubationszeit ist in Abbildung 5.23 für die jeweilige Frequenz des Phasenmaximums ($f_{max}^{axial} = 0,1 \text{ Hz}$, $f_{max}^{radial} = 0,01 \text{ Hz}$) zu sehen. Es sind nur die nicht nachträglich gesättigten Proben dargestellt.

Für beide Orientierungen ist ein Anstieg des spezifischen Widerstands mit zunehmender Inkubationszeit zu beobachten. Die Proben trocknen aus. In der Phase ist eine Abnahme über die Inkubationszeit zu sehen. Damit verhalten sich die mit dem Schwefelporling befallenen Proben ebenso wie die Proben mit dem Eichenwirrling.

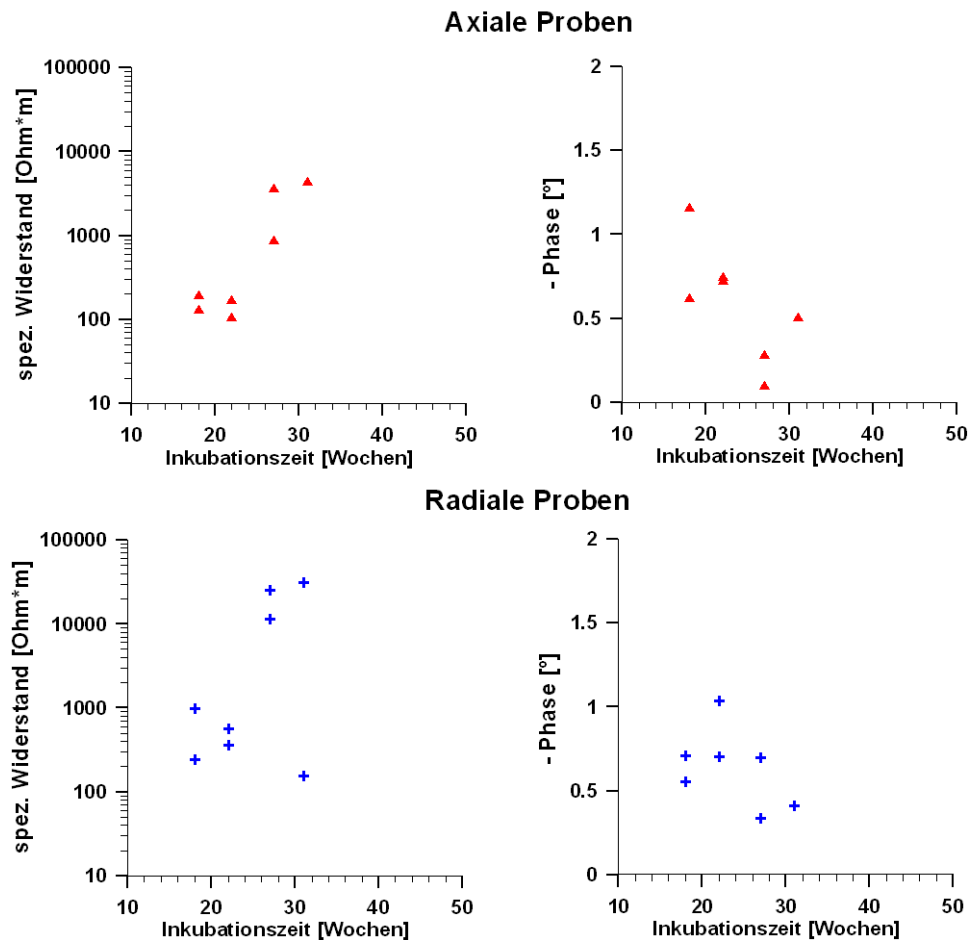


Abbildung 5.23: Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Inkubationszeit für das jeweilige Phasenmaximum ($f_{max}^{axial} = 0,1 \text{ Hz}$, $f_{max}^{radial} = 0,01 \text{ Hz}$). Die spezifischen Widerstände steigen mit zunehmender Inkubationszeit an. Die Phasen nehmen parallel dazu ab.

Der spezifische Widerstand und die Phase aufgetragen gegen die Abnahme des Darrgewichts sind in Abbildung 5.24) zu sehen. Der spezifische Widerstand steigt für die axialen und radialen Proben mit Abnahme des Darrgewichts. Parallel dazu sinken die Phasen kontinuierlich ab. Proben mit dem größten Holzabbau sind daher gekennzeichnet durch hohe spezifische Widerstände und geringe Phasen.

In Abbildung 5.25 ist zusätzlich der spezifische Widerstand und die Phase gegen die Holzfeuchte wiedergegeben. Mit steigender Holzfeuchte nehmen die spezifischen Widerstände ab und die Phasen zu. Dabei ist der Anstieg der Phase für die axialen Proben stärker als für die radialen Proben.

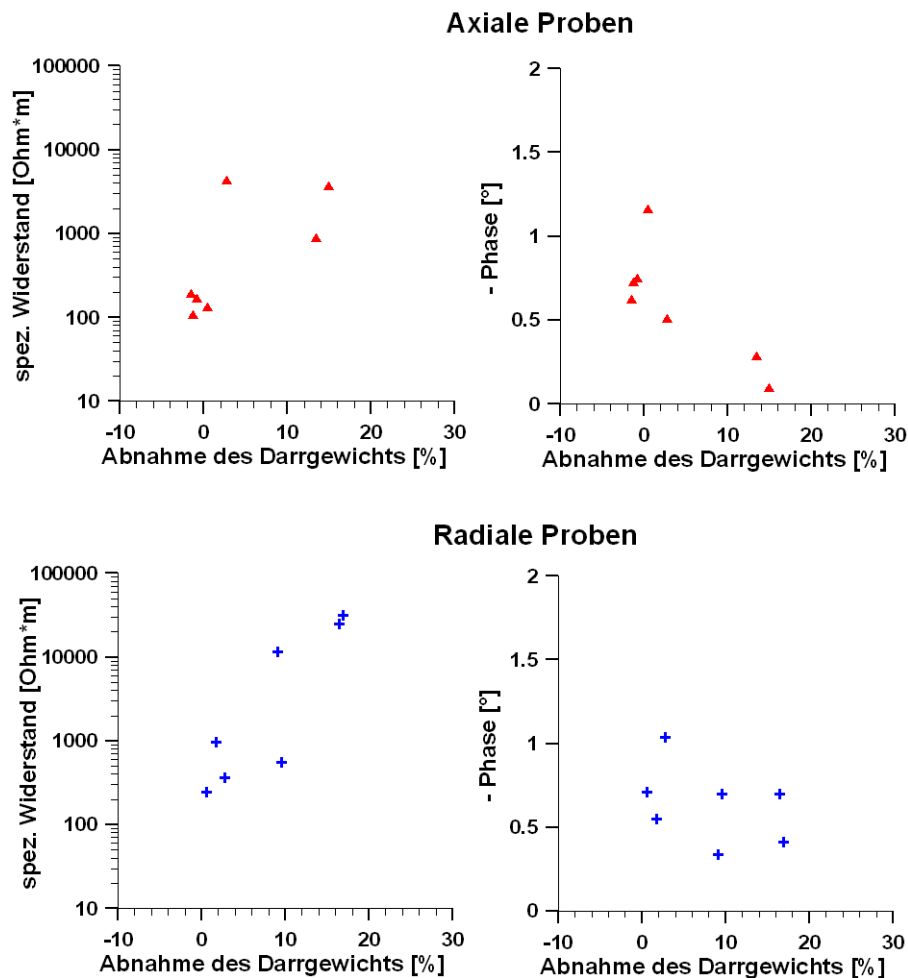


Abbildung 5.24: Versuch mit dem Schwefelporling. Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase aufgetragen gegen die Abnahme des Darrgewichts für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Mit Abnahme des Darrgewichts steigen die spezifischen Widerstände und sinken die Phasen.

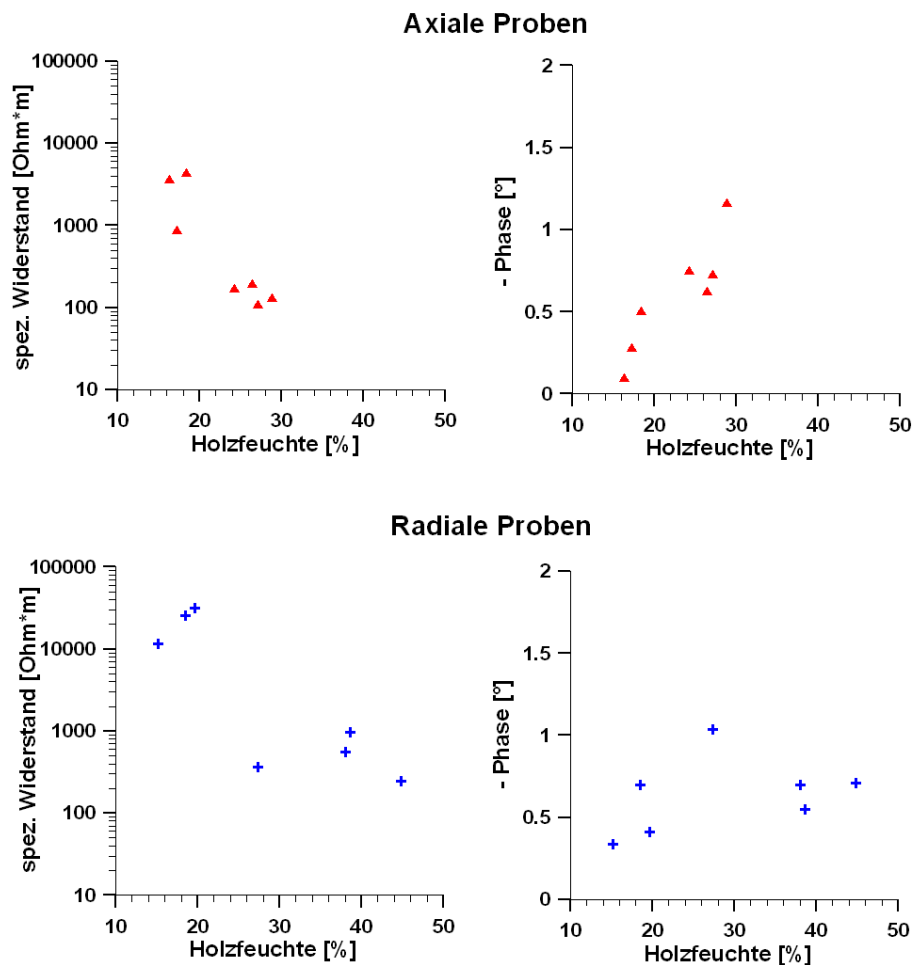


Abbildung 5.25: Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen gegen die Holzfeuchte für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Mit zunehmender Holzfeuchte sinken die spezifischen Widerstände und steigen die Phasen.

5.3.3 Vergleich

Die Ergebnisse der Proben mit dem Schwefelporlingsbefall (SP) stehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Eichenwirrlingsbefall (EW) (Abb. 5.26). Der spezifische Widerstand nimmt zunächst mit der Inkubationszeit ab. Zwischen den Inkubationswochen 22 - 25 steigt er stark an, was auf die Trocknung der Proben in den Petrischalen zurückzuführen ist. Die beobachtete Abnahme der Phase mit zunehmender Inkubationszeit ist hingegen das Resultat der durch den Pilz verursachte Holzerstörung.

Im Diagramm 5.27 (links) zeigt sich zusätzlich, dass sich die spezifischen Widerstände bei einer Holzfeuchte über 50 % nicht mehr entscheidend ändern. Die Phase hingegen verringert sich grundsätzlich mit zunehmenden Holzabbau (Abb. 5.27 rechts), jedoch ist die Abnahme des Darrgewichts beim Schwefelporling (orange Symbole) geringer als die des Eichenwirrlings. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

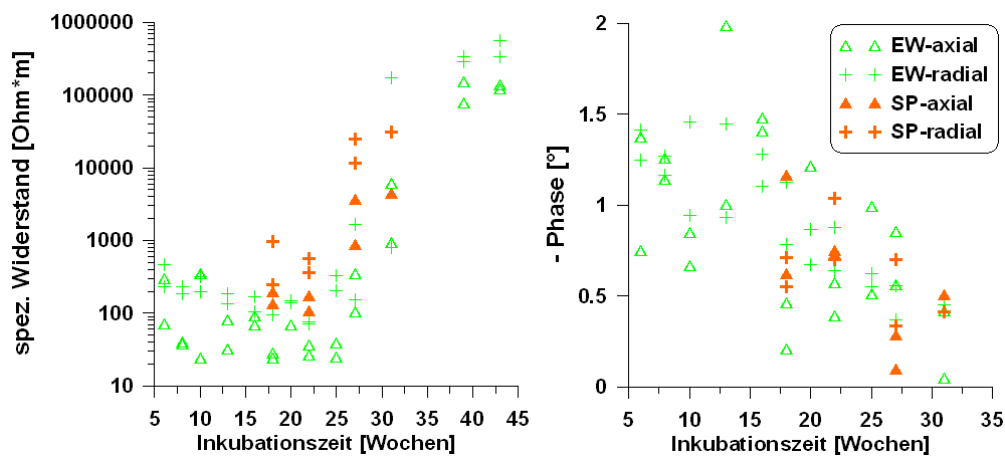


Abbildung 5.26: Vergleich der SIP-Daten von Schwefelporling (SP) und Eichenwirrling (EW). Beide Datensätze zeigen identische Trends.

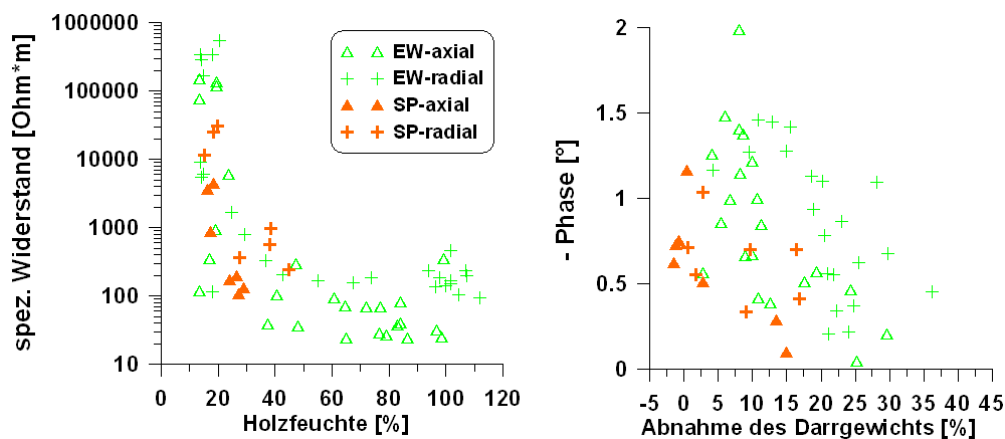


Abbildung 5.27: Vergleich der Ergebnisse des Schwefelporlings (SP) und des Eichenwirrlings (EW) für den spezifischen Widerstand über die Holzfeuchte (links) und die Phase über die Abnahme des Darrgewichts (rechts). Grundsätzlich haben beide Pilze einen ähnlichen Effekt.

5.4 Labormessungen an pilzbefallenen Eichen

Um die im Labor an Holzproben gewonnenen Erkenntnisse auch an lebendem Holz zu überprüfen, wurden zwei stehenden Eichen, die mit dem Eichenwirrling und Schwefelporling infiziert waren, gefällt und anschließend im Labor untersucht. Dabei war jedoch zu berücksichtigen, dass die Fäule am lebenden Holz langsamer voranschreitet als im Laborversuch, da der Baum aktiv versucht, dem Pilzbefall entgegenzuwirken bzw. ihn einzugrenzen.

5.4.1 Eiche mit Eichenwirrling (*Daedalea quercina*)

An einer ca. 150-jährigen Eiche in Berlin Steglitz-Zehlendorf wurde an einer ehemaligen Astungswunde in ca. 5 m Höhe ein Eichenwirrlingsbefall diagnostiziert. Die Fruchtkörper waren bereits zahlreich von außen sichtbar (Abbildung 5.28). Nach der Fällung wurden axiale Proben aus dem gesunden Teil des Kernholzes und dem durch Verfärbung sichtbaren Teil des pilzbefallenen Kernholzes entnommen (Abbildung 5.29). Die Schnitte durch den stark zersetzten Teil des Holzes waren schwierig, da das Holz beim Schneiden zerfiel.



Abbildung 5.28: Fruchtkörper des Eichenwirrlings einer stehenden Eiche. **Links:** Fruchtkörper an ehemaliger Astungswunde. **Rechts:** Ober- und Unterseite eines Fruchtkörpers vom Eichenwirrling.

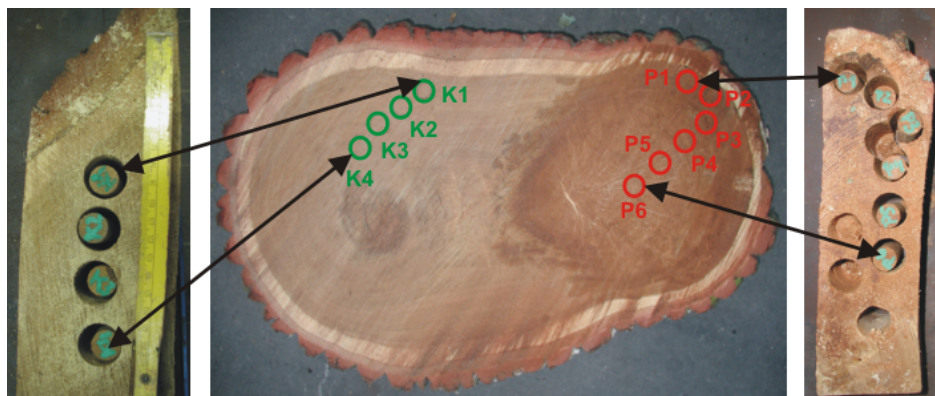


Abbildung 5.29: Gesamte Probenentnahme aus einer mit Eichenwirrling befallenen Eiche. **Links:** Entnahme der gesunden Eichenkernholzproben. **Rechts:** Entnahme der pilzbefallenen Kernholzproben.

Messungen

In Abbildung 5.30 sind die ausgewählten IP-Spektren der pilzinfierten Proben P4 und P5 und die der gesunden Proben K1 und K2 dargestellt. Die Unterschiede zwischen infiziertem und gesundem Holz sind signifikant. Der spezifische Widerstand des gesunden Holzes ist deutlich größer. Dazu erreichen die gesunden Eichenkernholzproben Phasen bis $-1,5^\circ$, während die infizierten Proben maximal $-0,3^\circ$ aufweisen und kein Phasenmaximum mehr sichtbar ist.

Die reelle Leitfähigkeit verhält sich invers zum spezifischen Widerstand. Probe P5 hat die höchsten reellen Leitfähigkeiten, Proben K1 und K2 die niedrigsten. In der imaginären Leitfähigkeit ist ebenfalls ein Unterschied zu sehen. Die imaginäre Leitfähigkeit nimmt mit zunehmenden Pilzbefall und dem daraus resultierenden Zellabbau ab.

Der an den Laborproben (Kapitel 5.3.1) beobachtete Einfluss von Pilzbefall an Eichenkernholz konnte hier sehr gut unter Realbedingungen beobachtet werden. Wie in diesem Versuch, zeigten die unbehandelten Laborproben höhere spezifische Widerstände und Phasen um ca. $-1,5^\circ$.

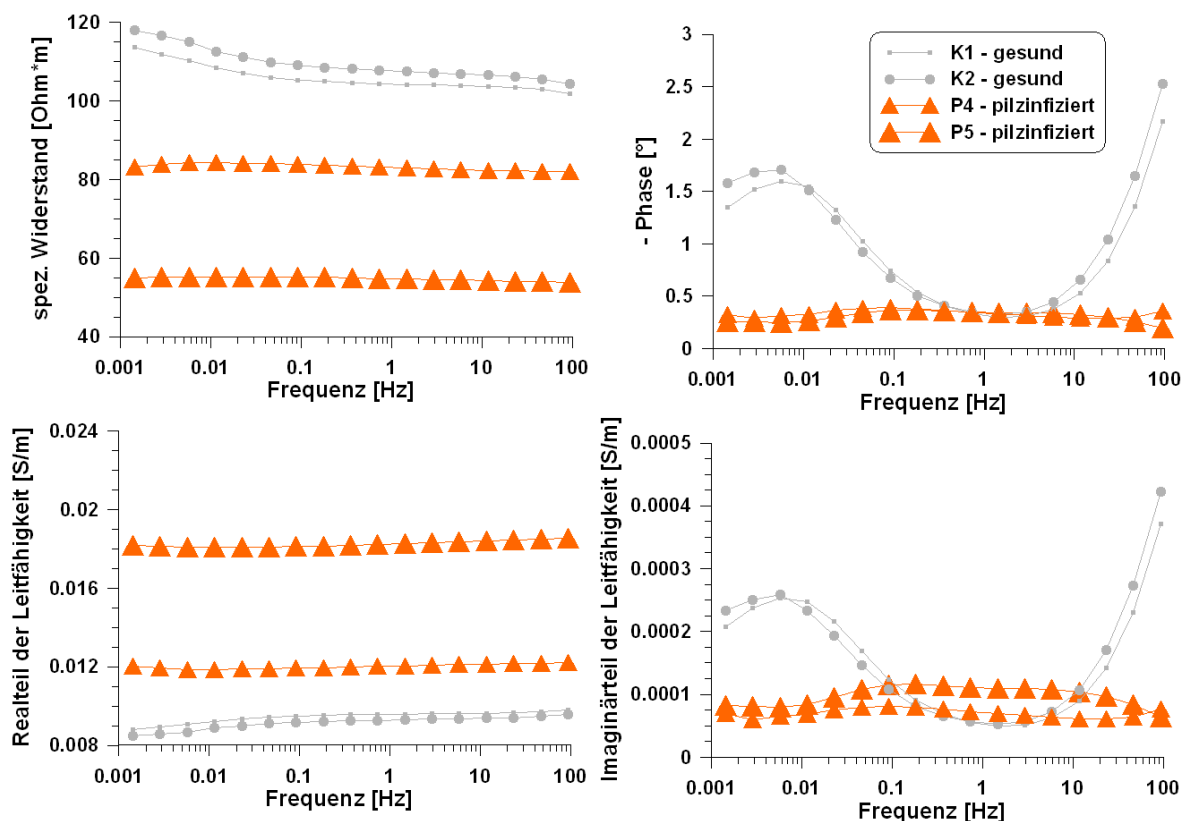


Abbildung 5.30: Spektren der mit dem Eichenwirring befallenen Eichenkernholzproben. Deutliche Unterschiede zwischen gesunden und infizierten Proben sind zu sehen.

5.4.2 Eiche mit Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*)

Von einer mit Schwefelporling infizierten Eiche wurden ebenfalls einige Proben im Labor untersucht. An diesem Baum ist auch im stehenden Zustand gemessen worden (siehe Kapitel 6.3). Die axial entnommenen Proben stammten aus dem reinen Splintholz, aus dem gesunden Teil des Kernholzes und aus dem infizierten Teil des Kernholzes (siehe Abbildung 5.31).



Abbildung 5.31: Foto der Probenentnahme aus einer mit dem Schwefelporling befallenen Eiche. Nach den Messungen am lebenden Baum (siehe Kap. 6.3) wurden Proben für die Labormessungen entnommen. Pilzbefall ist links durch die Verfärbung erkennbar.

Messungen

Die Spektren der Proben sind in Abbildung 5.32 dargestellt. Die spezifischen Widerstände sind bereits für die ungestörten Kernholzproben niedrig (um $70\ \Omega\text{m}$), jedoch verringert der Pilz sie noch einmal deutlich auf $20\ \Omega\text{m}$. Die Splintholzprobe weist ebenfalls niedrige Widerstände um $25\ \Omega\text{m}$ auf. Analog dazu verhält sich der Realteil der Leitfähigkeit. Die höchsten reellen Leitfähigkeiten zeigen die bepilzten Proben.

Der Unterschied zwischen befallenen und gesundem Holz ist deutlich in der Phase, bzw. im Imaginärteil der Leitfähigkeit erkennbar. Wie die Laborversuche zeigten, verringert der Pilz den Phaseneffekt. Das Phasenmaximum ist für die befallenen Proben mit unter $-0,5^\circ$ sehr klein. In dieser Größenordnung liegen die Phasen der Proben des Laborversuchs, die zwischen 27 und 31 Wochen dem Pilz ausgesetzt waren. Der imaginäre Anteil der Leitfähigkeit wird bei Pilzbefall ebenfalls geringer, da der Pilz die Grenzflächen (Holzzellwände) zerstört.

In Tabelle 5.4 sind die durchschnittlichen Phasenwerte für die infizierten und gesunden Proben bei verschiedenen Frequenzen angegeben. Umso kleiner die Frequenz, desto größer wird das Verhältnis der Phasen zwischen den gesunden und den infizierten Kernholzproben. So ist die Phase für gesundes Holz bei der niedrigste Frequenz ($0,003\ \text{Hz}$) mehr als 10 mal so groß wie für infiziertes Holz. Bei einer Frequenz von $0,183\ \text{Hz}$ betragen die Phasen der infizierten Proben dagegen nur noch ein Drittel des gesunden Holzes.

In Tabelle 5.5 sind zusätzlich die durchschnittlichen imaginären Leitfähigkeiten mit ihren Verhältnissen dargestellt. Für sehr kleine Frequenzen ist ebenfalls eine Abweichung erkennbar. Im Bereich um 0,1 Hz werden die Unterschiede jedoch geringer.

Eichenkernholz	$f = 0,003 \text{ Hz}$	$f = 0,011 \text{ Hz}$	$f = 0,183 \text{ Hz}$	$f = 1,465 \text{ Hz}$
gesund	2,36	2,21	0,87	0,35
pilzbefallen	0,22	0,27	0,31	0,24
<i>Quotient</i>	<i>10,63</i>	<i>8,29</i>	<i>2,81</i>	<i>1,47</i>

Tabelle 5.4: Durchschnittliche Phasenwerte [$^{\circ}$] der mit Schwefelporling befallenen, lebenden Eiche für verschiedene Frequenzen.

Eichenkernholz	$f = 0,003 \text{ Hz}$	$f = 0,011 \text{ Hz}$	$f = 0,183 \text{ Hz}$	$f = 1,465 \text{ Hz}$
gesund	0,578	0,556	0,228	0,092
pilzbefallen	0,197	0,232	0,268	0,205
<i>Quotient</i>	<i>2,94</i>	<i>2,40</i>	<i>0,85</i>	<i>0,45</i>

Tabelle 5.5: Durchschnittliche imaginäre Leitfähigkeiten [10^{-3} S/m] der mit Schwefelporling befallenen, lebenden Eiche für verschiedene Frequenzen.

5.5 Erkenntnisse aus den Labormessungen

In diesem Kapitel wurden Experimente an Eichenkernholzproben mit dem SIP-Verfahren im Labor durchgeführt. Generell ist Eichenkernholz elektrisch leitfähig und polarisierbar. Zu Beginn dieses Kapitels wurden Art und Größe des Anisotropieeffektes gezeigt. Die Anisotropie konnte im spezifischen Widerstand, in der Phase und im Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit eindeutig nachgewiesen werden. Proben aus axialer Richtung zeigten dabei die geringsten spezifischen Widerstände und die höchsten Phasen. An den radialen und tangentialen Proben wurden höhere spezifische Widerstände gemessen und die Phaseneffekte waren geringer.

Diese Ergebnisse lassen sich gut mit den strukturellen Unterschieden im Holzaufbau erklären. Die Ionenbeweglichkeit erfolgt zum großen Teil in axialer Richtung aufgrund der fibrillären⁴ Strukturen der Cellulose und des lamellenartigen Aufbaus der Zellwand (*Du* (1991)). Die Strukturen in axialer Richtung begründen damit die geringen spezifischen Widerstände. Nährstoff- und Wassertransporte in radialer Richtung hingegen sind selten und geschehen innerhalb der Holzstrahlen. Transporte in tangentialer Richtung sind praktisch nicht vorhanden, weshalb hier die höchsten spezifischen Widerstände gemessen wurden.

Eine weitere Erkenntnis ist die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands der axialen Proben von der räumlichen Lage innerhalb des Kernholzes. Es zeigte sich, dass jüngeres Eichenkernholz höhere spezifische Widerstände und höhere Phasen aufweist als älteres Eichenkernholz. Diese sind gekennzeichnet durch sehr niedrige spezifische Widerstände

⁴Fibrillen = feinste, langgestreckte Zellfasern.

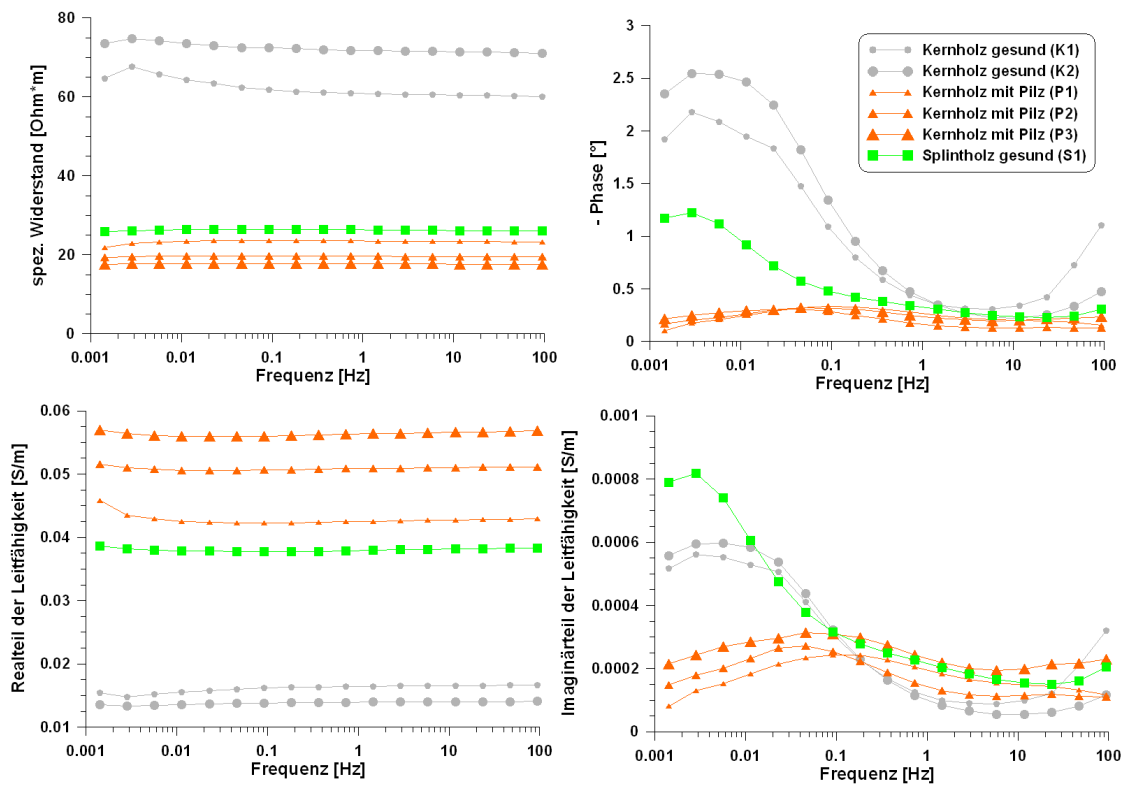


Abbildung 5.32: Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit einer mit Schwefelporling infizierten Eiche. Die unbefallenen Kernholzproben haben niedrige spezifische Widerstände ($\sim 70 \Omega m$). Diese werden durch den Pilzbefall deutlich verringert. In der Phase sind die pilzbefallenen Kernholzproben eindeutig von den anderen Kernholzproben unterscheidbar.

und niedrige Phasen. Die imaginäre Leitfähigkeit zeigte geringere Unterschiede zwischen den Proben als die Phase. Damit sind die Unterschiede in der Phase zum großen Teil auf die veränderte Leitfähigkeit im Porenfluid zurückzuführen und weniger auf die Polarisationsprozesse an den Grenzflächen der Holzzellwände.

Die Ergebnisse stehen damit scheinbar im Widerspruch zu der Tatsache, dass die Permeabilität und Porosität durch den Verschluss der Tüpfel und die Verkernung des Holzes heruntergesetzt wird und die Dichte damit steigt. Von daher sollte mit zunehmendem Alter des Holzes der spezifische Widerstand und die Phase steigen. Die gemessenen Versuchsreihen zeigten dies jedoch nicht. Eine Erklärung dafür liefern *Piirto und Wilcox* (1978). Sie schreiben, dass die eingelagerten phenolischen Inhaltsstoffe im Kernholz einen Einfluss auf die Leitfähigkeit haben. Zusätzlich sind die Zellwände des Kernholzes teilweise von gutleitenden Gerbstoffen durchtränkt (*Wagenführ* (1999), vgl. Kapitel 2.6). Die im Holz eingelagerten Salze und Säuren stellen damit eine Ionenquelle dar, womit die geringen spezifischen Widerstände im inneren Kernholz erklärt werden können. Aus den Untersuchungen von *Breede* (2006) und *Kruschwitz* (2007) zu SIP-Messungen an Sandstein ist zusätzlich bekannt, dass mit steigender Salzkonzentration die Phase abnimmt, da bei steigender Salinität die (elektrische) Leitung zum überwiegenden Teil im Porenraum stattfindet und nicht mehr an den Grenzflächen. Daraus resultieren die ebenfalls sehr geringen Phasen im inneren Kernholz. Die Ursache für den Anstieg der Leitfähigkeit ist demnach eine steigende Ionenkonzentration mit zunehmendem Kernholzalter.

Da die Holzfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf den spezifischen Widerstand und die Phase hat (vgl. Kapitel 2.4.1), wurden mehrere Entsättigungsmessungen an Eichenkernholz unter Berücksichtigung der Anisotropie durchgeführt. Dabei zeigte sich eine klare Korrelation des spezifischen Widerstands mit der Holzfeuchte. Mit zunehmender Sättigung nimmt der spezifische Widerstand ab. Die Phase verhielt sich zweigeteilt. Zu Beginn stieg die Phase für die Mehrzahl der Proben bis zu einer Holzfeuchte von ca. 50 % an. Bei höheren Holzfeuchten bis hin zur Vollsättigung nahm die Phase für alle Proben ab, jedoch nicht so stark. Die Ursache dafür kann in dem Verhältnis von gebundenem Wasser der Holzzellwände und dem freien Wasser in den Holzzellen und damit in dem Verhältnis von Realteil zum Imaginärteil der Leitfähigkeit liegen. Mit beginnender Sättigung steigt zuerst der Anteil des gebundenen Wassers. Damit steigt die imaginäre Leitfähigkeit, während der Realteil der Leitfähigkeit konstant bleibt. Die Phase steigt an. Um den Fasersättigungsbereich (ca. 25 % Holzfeuchte) sind die Holzzellwände komplett mit Wasser gefüllt. Nun beginnt der Anteil des freien Wassers zu steigen und der Realteil der Leitfähigkeit nimmt zu, während der Imaginärteil stagniert. Die Phase nimmt ab. Die Differenz zwischen dem Fasersättigungsbereich von Eiche und der beobachteten Abnahme der Phase ab ca. 50 % Holzfeuchte kann möglicherweise auf das individuelle Entsättigungsverhalten der Proben zurückgeführt werden.

Der Einfluss von Pilzbefall auf den spezifischen Widerstand und die Phase war Ziel zweier Langzeitlaborversuche mit verschiedenen Baumpilzen.

Im ersten Versuch wurden im Labor Eichenkernholzproben mit dem Eichenwirrling (*Daedalea quercina*) infiziert. Die gemessenen Spektren zeigten eine eindeutige Abnahme des Phaseneffektes mit fortschreitender Inkubationszeit. Der spezifische Widerstand korreliert in erster Linie mit der variierenden Holzfeuchte. In den ersten 22 - 25 Inkubationswochen nahm der spezifische Widerstand ab. Danach stieg er stark an, da die

Proben zunehmend trockener wurden.

Ähnliche Ergebnisse zeigte der Versuch mit dem Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*). Auch hier nahm die Phase mit zunehmender Inkubationszeit ab. Dieser Versuch war ursprünglich über einen längeren Zeitraum ausgelegt. Da die Proben aber schnell austrockneten, mussten sie bereits nach der vierten Probenentnahme für die SIP-Messungen gesättigt werden. Die Zugabe von Wasser veränderte jedoch die Ergebnisse vom spezifischen Widerstand und der Phase und machten damit eine Interpretation des Pilzeinflusses unmöglich.

Bei beiden Pilzen nahm die Phase mit der Abnahme des Darrgewichts (Abbau der Holzstruktur) ab. Es konnte ebenso beobachtet werden, dass der spezifische Widerstand bei Holzfeuchte bis 50 % stark abnimmt und sich darüber hinaus auf ein bestimmtes Niveau einstellt. Ab diesem Zeitpunkt trägt nur noch das zusätzliche freie Wasser zur Holzfeuchte bei. Dieses zusätzliche Wasser hat aber nur noch einen sehr geringen Einfluss auf die Leitfähigkeit.

Die Verteilung der Poreneingangsdurchmesser aus der Quecksilberporosimetrie belegen eine Zerstörung kleinster Zellen durch den Pilz. Der dominante Poreneingangsdurchmesser steigt mit fortschreitender Inkubationszeit. Das zeigt, dass der Pilz die Zellstruktur deutlich verändert. Kleinporige Zellen bzw. die kleinporigen Zelleingänge werden zerstört und übrig bleibt ein höherer Anteil von größeren Zellstrukturen. Damit sinkt mit zunehmender Inkubationszeit die Aufladbarkeit. Das bedeutet, dass infiziertes Holz nicht mehr so stark polarisierbar ist wie gesundes Holz.

Der pilzverursachte Abbau ist prinzipiell auch in den mikroskopischen Aufnahmen erkennbar. Die Zellstruktur löst sich auf. An den Aufnahmen konnte gezeigt werden, dass die gemessenen dominanten Poreneingangsdurchmesser mit der Größe der Hoftüpfel korrelieren.

Die aus dem Laborversuch gewonnenen Ergebnisse konnten für beide Pilze auch am stehendem Baum bestätigt werden. Infiziertes Holz wird leitfähiger aufgrund der Feuchtigkeit des Pilzes. Die imaginäre Leitfähigkeit und die Phasenverschiebung nehmen mit Pilzbefall ab. Beide sind abhängig von den Grenzflächen der Holzzellwände, die durch den Pilz zerstört werden. Eine Unterscheidung in der Phasenverschiebung zwischen infiziertem und gesundem Holz ist am deutlichsten bei sehr niedrigen Frequenzen zu sehen. Bei Frequenzen über 1 Hz sind Rückschlüsse aus den Spektren nur noch schwer möglich.

Aus den Laborversuchen können Rückschlüsse für Messungen am lebenden Baum gezogen werden. So wird sich der Strom am Baum bevorzugt in Wachstumsrichtung (axial) ausbreiten. Die Feuchte im stehenden Baum ist, verglichen mit den Feuchtezuständen im gelagerten Holz, sehr hoch. Jahreszeitliche Schwankungen sollten demnach Unterschiede im spezifischen Widerstand und in der Phase hervorrufen. Da lebende Eichen i. d. R. Holzfeuchten über 50 % aufweisen, steigen sowohl spezifischer Widerstand als auch Phase mit zunehmender Trockenheit an. Pilzbefall im Baum müsste sich dann durch eine Verringerung des spezifischen Widerstands bemerkbar machen. Im Endstadium erhöht sich der spezifische Widerstand sehr stark. Die Phase wird aufgrund der Zerstörung der Holzstruktur mit zunehmenden Pilzbefall kleiner. Die ideale Messfrequenz liegt < 1 Hz, da dort die Unterschiede zwischen infizierten und gesunden Holz am größten sind.

Mit diesem Wissen müsste es möglich sein, Pilzschäden im Baum zu detektieren.

6 Feldmessungen

Die aus den Kapiteln 4 und 5 gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlagen für die nun folgenden Feldmessungen. Zu Beginn dieses Kapitels werden die Ergebnisse der tomographischen Messungen an gesunden, stehenden Eichen gezeigt. Schwerpunkte dabei bilden die Frequenzabhängigkeit, die Jahreszeitenabhängigkeit und der Einfluss des Baumalters. Diese Messungen dienen auch als Referenz für pilzbefallene Eichen. Anschließend werden an drei Eichen mit Pilzbefall die Möglichkeiten und Grenzen des SIP-Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von Bäumen deutlich gemacht.

6.1 Gesunde Referenzeiche

An einer gesunden ca. 150-jährigen Eiche (*Quercus robur*) in Waldlage auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit in Horstwalde (Landkreis Teltow-Fläming) werden seit 2005 Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt. Dazu sind in ca. 60 cm Höhe 24 Stahlnägel ($1 \sim 55$ mm) als Elektroden in äquidistantem Abstand ($a \sim 10$ cm) durch die Rinde in die ersten Jahrringe eingeschlagen. Die Nägel verbleiben im Baum um gleichbleibende Elektrodenpositionen zu gewährleisten. Da die Nägel rosten, mussten sie vor jeder Messung abgebürstet werden.

Die Messreihe wurde mit einer Dipol-Dipol-Konfiguration begonnen. Um die Daten über die Jahre vergleichen zu können, wurde damit weiterhin gemessen. Der Frequenzbereich für die tomographischen Messungen lag (aus Zeitgründen) zwischen 0,156 Hz und 10 Hz.

Darüber hinaus wurde an diesem Baum mit der Bipol-Dipol-Auslage gemessen. Die Geoelektrik-Apparatur 4-Punkt-Light (*Lippmann* (2008)) wurde ebenfalls eingesetzt und lieferte ähnliche Ergebnisse. Die speziell für Baummessungen entwickelte Elektrikapparatur Treetric (*argus electronic* (2008a)) war Teil eines Vergleichs der in Abbildung C.3 zu sehen ist. Des Weiteren wurde ein Datensatz zu Vergleichszwecken mit dem Inversionsprogramm CRTomo (*Kemna* (2000)) ausgewertet (siehe Abbildung C.4). Damit sollte ausgeschlossen werden, dass mögliche Effekte in den Tomogrammen nur auf die Inversionssoftware zurückzuführen sind.

Zusätzlich wurde die Eiche mit zwei weiteren, baumgutachterlichen Verfahren untersucht. Dabei kam der Pcus-Schalltomograph (*argus electronic* (2008b)), vgl. dazu Abbildung C.1) und das mechanische Bohrwiderstandsgerät Resistograph Resi E500 der Firma IML (*IML* (2005), Abbildung C.2) zum Einsatz. Beide Verfahren zeigten in ihren Daten einen gesunden Baum.

Die SIP-Ergebnisse dieser Eiche bilden damit die Referenz für die später untersuchten, pilzgeschädigten Eichen.

6.1.1 Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung

Unter Berücksichtigung der Geometrie (Querschnitt) des Baumes in der Messebene wurden die Daten mit dem Inversionsprogramm DC2dTree (Kapitel 3.2.4) invertiert. Die Tomogramme der Referenzeiche in der Sommerperiode 2007 sind für die niedrigste im Feld gemessene Frequenz ($f = 0,156 \text{ Hz}$) in Abbildung 6.1 dargestellt. Eine gesunde Eiche zeichnet sich im spezifischen Widerstand (a), in der Phase (b) sowie in dem Real- (c) und Imaginärteil (d) der Leitfähigkeit durch konzentrische, ringförmige Strukturen aus. Die äußerste Randzone ist gut leitfähig (spezifische Widerstände $< 200 \Omega\text{m}$). Sie stimmt in etwa mit dem Bereich des Splintholzes überein. Dort finden die Wasser- und Nährstofftransporte des Baumes in axialer Richtung statt. Im verkerntem Holz erhöhen sich die spezifischen Widerstände deutlich auf Werte um $500 \Omega\text{m}$, da das Kernholz nicht mehr am aktiven Wassertransport des Baumes beteiligt ist. Im Inneren des Baumes, im ältesten Kernholzbereich, verringern sich die spezifischen Widerstände wieder auffallend. Wie in den Labormessungen bereits zu sehen (Kap. 5.1) sinken sie zum Teil bis unter $100 \Omega\text{m}$.

Anomalien am Baumrand (vereinzelte höherohmige Werte) sind aufgrund schlechter Elektrodenankopplung und/oder fehlerbehafteten Einheiten (Relaisprobleme der RUs) der Messapparatur erklärbar (vgl. Kapitel 4.6).

Im Tomogramm der Phasen sind ebenfalls konzentrische Ringe erkennbar. Der äußerste, vollgesättigte Splintholzbereich ist durch niedrige Phasen ($-0,5^\circ$ bis $-0,7^\circ$) gekennzeichnet. Dies entspricht den Ergebnissen aus den Laborentsättigungsmessungen (Kapitel 5.2). An der Grenze zum Kernholz erhöhen sich die Phasenwerte auf bis zu $-1,8^\circ$. Das Holz wird trockener. Im Zentrum des Baumes nehmen sie jedoch wieder auf bis zu -1° ab. Das deutet erneut auf Feuchtigkeit oder höhere Fluidleitfähigkeit hin. Dieser innere Kernholzbereich mit den geringeren Phasen erscheint jedoch (bei dieser Farbwahl) in der Ausdehnung um ein Vielfaches kleiner als der innere, gut leitfähige Bereich im Tomogramm des spezifischen Widerstands.

Der Realteil (c) verhält sich analog zum spezifischen Widerstand. Außen und im Zentrum des Baumes werden die höchsten Leitfähigkeiten gemessen. Dazwischen befindet sich ein Ring niedrigerer Leitfähigkeiten. Der Imaginärteil der Leitfähigkeit verhält sich ähnlich. Dort sind im Wesentlichen nur zwei Strukturen erkennbar. Ein breiter, äußerer Ring mit niedrigen Leitfähigkeiten sowie einen ausgeprägten zentralen Bereich höherer Leitfähigkeiten im Inneren. Ganz im Zentrum des Baumes sinkt die imaginäre Leitfähigkeit wieder leicht ab.

Der Baum weist weder visuell noch mit anderen Messverfahren (Schalltomographie in Abb. C.1, Bohrwiderstand in Abb. C.2) Anzeichen einer Schädigung auf. Daher kann die niederohmige, niedrigphasige Zone im Zentrum des Baumes mit den in Kapitel 5.1 bereits erwähnten eingelagerten phenolischen Stoffen im Kernholz erklärt werden. Durch eine erhöhte Ionenkonzentration verringern sich der spezifische Widerstand und die Phase und es steigen die Leitfähigkeiten.

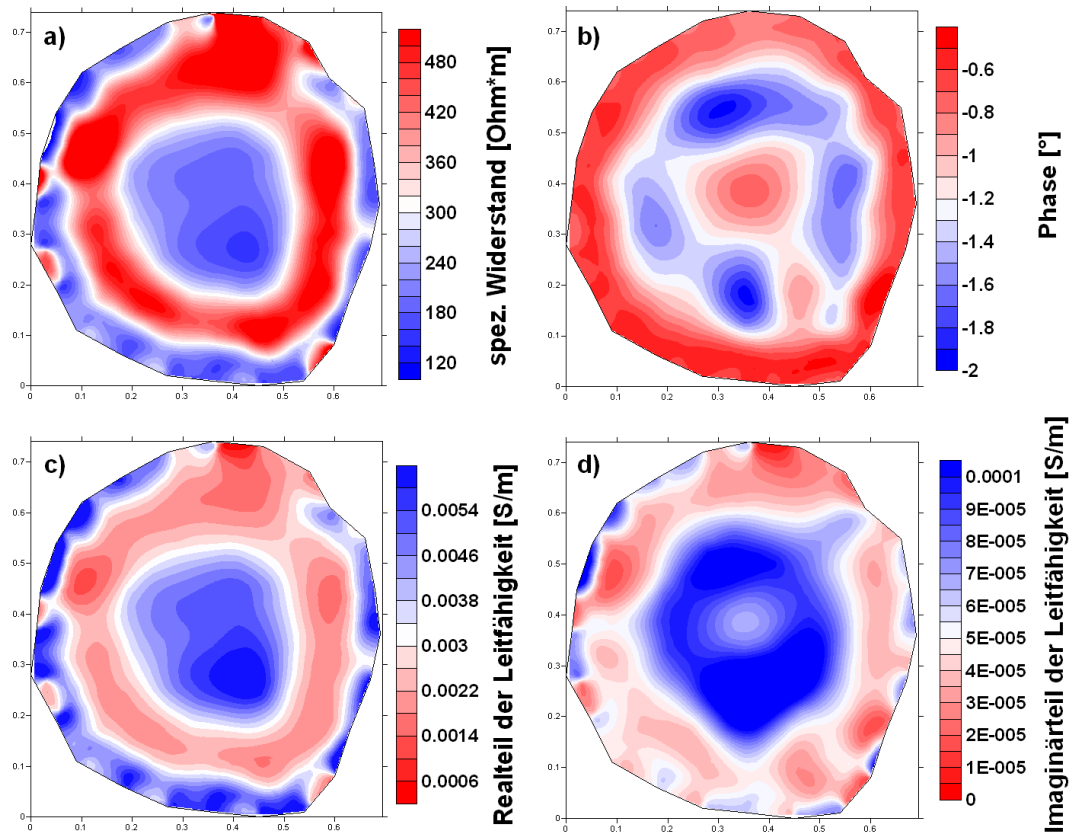


Abbildung 6.1: Tomogramme des spezifischen Widerstands (a), der Phasenverschiebung (b) und des Real- (c) und Imaginärteil (d) der Leitfähigkeit einer gesunden Eiche (Referenzeiche) auf dem BAM Testgelände für die Frequenz 0,156 Hz im Sommer. Deutlich sind konzentrische, ringförmige Strukturen zu erkennen.

6.1.2 Frequenzabhängigkeit

Die Tomogramme der Referenzeiche sind für verschiedene Messfrequenzen (Dipol-Dipol-Auslage) in Abbildung 6.2 dargestellt. Wie aus den Labormessungen zu erwarten, bleibt der spezifische Widerstand im betrachteten Frequenzbereich (0,156 Hz - 10 Hz) weitestgehend konstant. Die Phasentomogramme ändern sich jedoch deutlich. Die innere, niedrigphasige Zone im Zentrum des Baumes wird mit zunehmender Frequenz größer. Die Phase reagiert mit steigender Frequenz sehr empfindlich auf jedwede Art von Elektroden- oder Ankopplungsproblemen (zusätzlich auftretende Elektrodenpolarisation an den Stahlnägeln). Wie in den Labormessungen gezeigt (vgl. Kapitel 5.4.2), sind die Unterschiede in den Phasenspektren bei Frequenzen > 1 Hz sehr klein. Daher können bei der Mehrzahl von Bäumen bei höheren Frequenzen derzeit keine verwertbaren Informationen aus den Tomogrammen der Phase gewonnen werden. Die ringförmige Struktur ist i. d. R. im Phasentomogramm ab 1 Hz aufwärts nicht mehr erkennbar.

6.1.3 Jahreszeitenabhängigkeit

Über vier Jahre hinweg sind an der Referenzeiche Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt worden. Im Untersuchungszeitraum fanden zehn Untersuchungen statt, deren Ergebnisse komplett im Anhang dargestellt sind (Abb. C.5 und C.6). Die aus den Labormessungen (Kapitel 5) zu erwartenden, gravierenden Unterschiede zwischen einer Messung im Sommer und im Winter sind in Abbildung 6.3 zu sehen. Gut sichtbar sind bereits die oben beschriebenen, ringförmigen Strukturen im spezifischen Widerstand und in der Phase. In dem Widerstandstomogramm der Messung im Winter fallen sofort die höheren spezifischen Widerstände auf. Der Splintholzbereich ist nicht vom Kernholzbereich zu unterscheiden, da der Baum im Winter den Wassertransport einstellt und damit eine geringere Holzfeuchte aufweist. Der Baum ist insgesamt trockener. Die Zone der niedrigen spezifischen Widerstände im Inneren bleibt hingegen erhalten, ist jedoch nicht mehr ganz so niedrig.

Die Tomogramme der Phasen zeigen ebenfalls Veränderungen, die sich jedoch nicht so stark auswirken. Obwohl kein Wassertransport mehr in axialer Richtung stattfindet, bleiben die Phasen am Baumrand niedrig, auch wenn der äußere Ring scheinbar schmaler wird. Das Splintholz weist, unabhängig von der Holzfeuchte, geringere Phasen auf als das Kernholz (vgl. Abbildung 5.32). Die niedrigphasige Zone im Zentrum des Baumes ist bei der Wintermessung scheinbar größer als bei der Sommermessung.

In Abbildung 6.4 ist zusätzlich eine lineare Darstellung der jahreszeitlichen Unterschiede in Abhängigkeit vom Abstand zur Baummitte abgebildet. Dabei zeigen sich die oben angesprochenen Unterschiede zwischen Splint- und Kernholz, sowie zwischen Messungen im Sommer und Winter noch einmal deutlich.

Im Anhang (Abb. C.7) sind zusätzlich die saisonalen Veränderungen von Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit für vier unterschiedliche Messungen der Referenzeiche dargestellt. Auch dort ist eine Abhängigkeit von der Jahreszeit erkennbar.

Die jahreszeitlichen Veränderungen wirken sich damit deutlich im Baum aus. Diese Veränderungen sind jedoch reversibel. Wie in den Abbildungen C.5 und C.6 zu sehen, zeigen die Messungen innerhalb einer Wachstumsperiode grundsätzlich dieselben

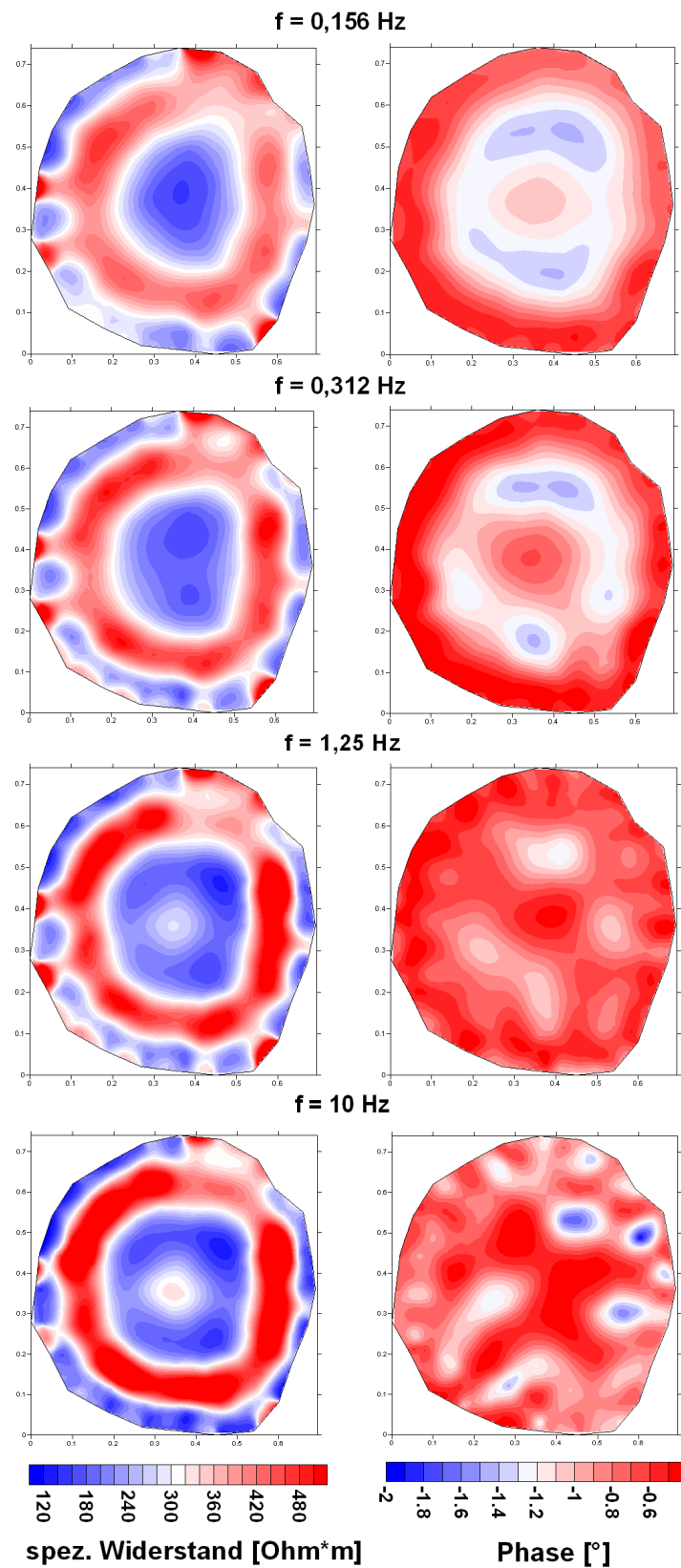


Abbildung 6.2: Frequenzabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands (links) und der Phasenverschiebung (rechts) der Referenzeiche im Sommer 2008. Während im spezifischen Widerstand nur geringfügige Änderungen erkennbar sind, werden die Tomogramme der Phasenverschiebung bei Frequenzen über 1 Hz deutlich unstrukturierter.

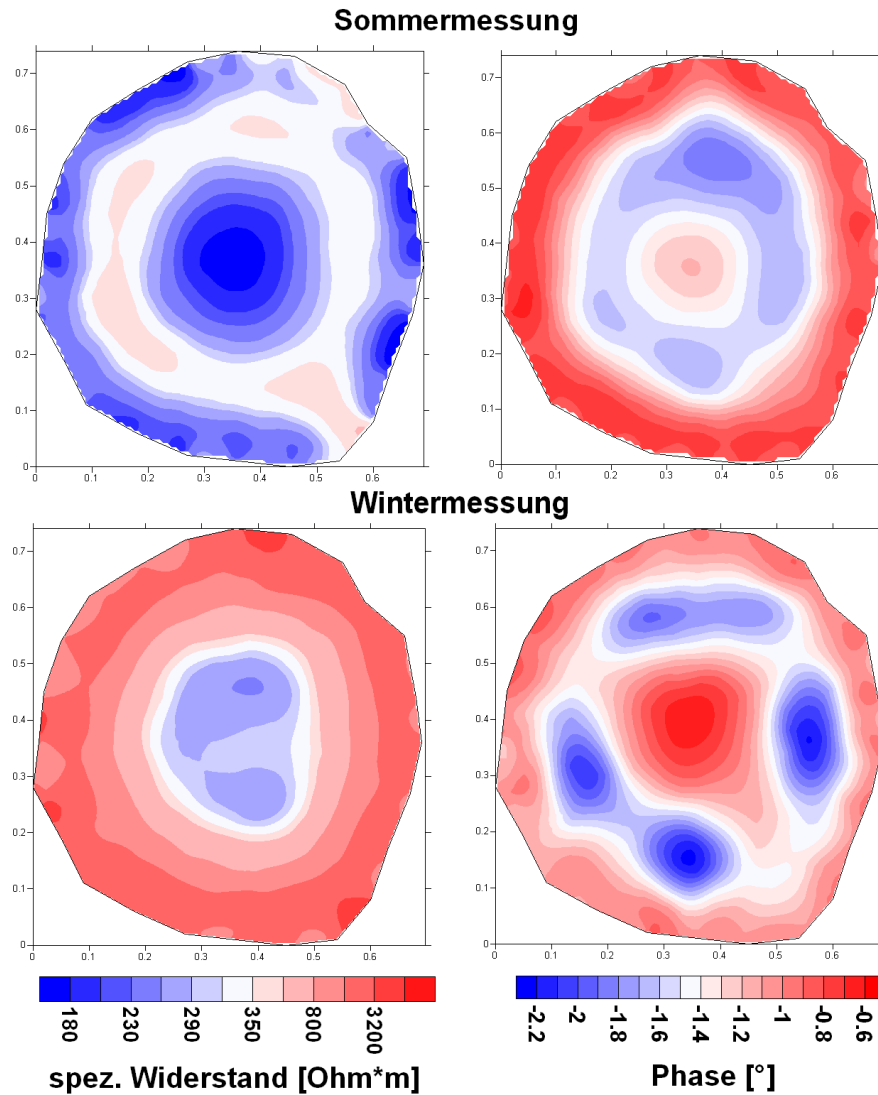


Abbildung 6.3: Jahreszeitenabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands (links) und der Phasenverschiebung (rechts) der Referenzeiche (Dipol-Dipol-Konfiguration). Im Winter (untere Tomogramme) sind infolge des eingestellten Wassertransportes und des Temperatureffektes die spezifischen Widerstände wesentlich höher.

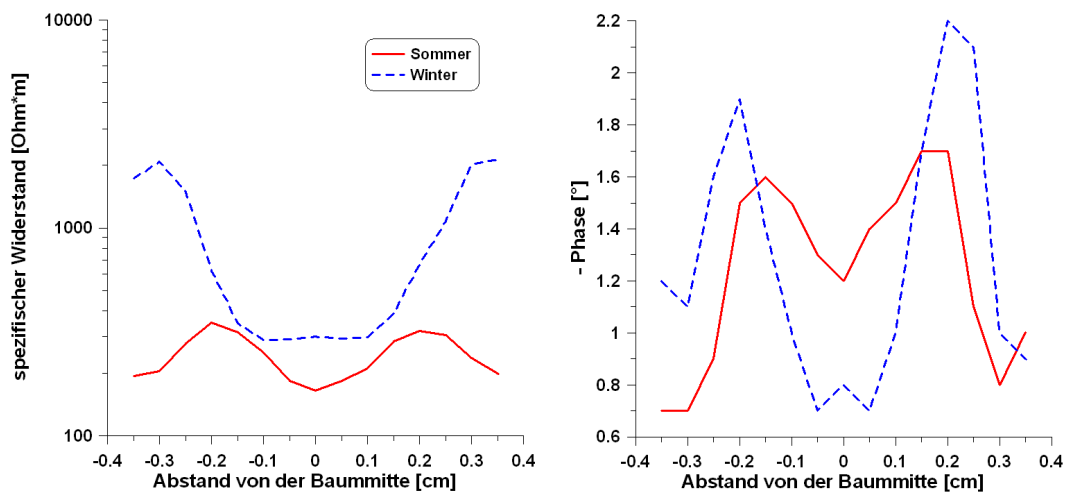


Abbildung 6.4: Lineare Darstellung der jahreszeitlichen Unterschiede einer gesunden Eiche in Abhängigkeit vom Abstand zur Baummitte.

Strukturen.

Hauptursache für die jahreszeitlichen Änderungen im komplexen Widerstand ist der saisonale Wasser- und Nährstofftransport des Baumes. Zusätzlich hat die Temperatur selbst einen Einfluss auf den spezifischen Widerstand. Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, nimmt der spezifische Widerstand mit abnehmender Temperatur zu. Dabei wird der Temperatureinfluss umso größer, je geringer die Holzfeuchte ist. Allerdings schwächt sich der Einfluss mit zunehmender Kernholztiefe ab (*Burmester* (1978)).

Über die vier Jahre hinweg sind in den Tomogrammen leichte Variationen innerhalb derselben Wachstumsperioden sichtbar. Dies liegt vorwiegend an den unterschiedlichen Bedingungen der Messungen (variierende Temperatur, korrodierte Nägel, defekte RUs, etc.).

6.2 Vergleich von Eichen verschiedenen Alters

6.2.1 Junge Eiche

Um den Einfluss des Baumalters auf die SIP-Messungen zu untersuchen, wurden ebenfalls gesunde, aber wesentlich jüngere Eichen (60 a) auf dem BAM Testgelände untersucht. Dazu wurde in einer Bipol-Dipol-Auslage im Frequenzbereich zwischen 0,156 Hz und 1000 Hz im Sommer und Winter 2008 gemessen.

In Abbildung 6.5 sind für fünf verschiedene Frequenzen die Inversionsergebnisse einer Eiche im Sommer dargestellt. Bei den Messungen war die Ankopplung und die Reproduzierbarkeit sehr gut. In diesem Fall war es möglich, in den Phasentomogrammen die konzentrischen Strukturen bei Frequenzen bis 125 Hz zu erkennen. Dort stiegen jedoch durch den elektromagnetischen Kopplungseffekt die Phasen so stark an, dass die Farbskala angepasst werden musste.

Für die Frequenz $f=0,156\text{ Hz}$ wird im spezifischen Widerstand und in der Phase nur die Grenze zwischen Splint- und Kernholz sichtbar. Von einer Zone niedriger spezifi-

scher Widerstände im Zentrum des Baumes ist im Unterschied zu den Tomogrammen der älteren Referenzeiche nichts zu sehen.

Allerdings deutet sich diese Anomalie bei höheren Frequenzen im spezifischen Widerstand an. In der Phasenverteilung sind ab 10 Hz gegensätzliche Phasenverläufe erkennbar. So sind nun im äußeren Bereich hohe Phasen und im Zentrum niedrige Phasen zu sehen. Bei 125 Hz erscheinen dann dieselben Phasenstrukturen, die bei der Referenzeiche bei $f = 0,156$ Hz zu sehen sind.

Die Änderung der Phase mit der Frequenz ist aus den Labormessungen (Kapitel 5) bekannt. Bei sehr niedrigen ($< 0,01$ Hz) Frequenzen sind die Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Laborproben am größten. Bei Frequenzen zwischen ca. 1 Hz und 100 Hz verschwimmen die Phasenunterschiede und es kann in den Tomogrammen zu gegensätzlichen Phasenverläufen kommen.

Erfreulich an dieser Messung ist die Tatsache, dass es bei einer guten Elektrodenan-
kopplung und einem funktionierendem Messsystem doch möglich ist, bei höheren Frequenzen strukturierte Tomogramme der Phase zu erhalten. Um diese jedoch sinnvoll zu interpretieren, müssten sowohl in den Laborspektren als auch in den Tomogrammen die elektromagnetischen Kopplungseffekte berücksichtigt werden.

6.2.2 Alte Eichen - Vergleich

Auf dem BAM Testgelände befinden sich auch vereinzelt sehr alte Eichen (~ 350 a). An zwei dieser Eichen wurde mit einer Bipol-Dipol-Auslage im Sommer 2008 gemessen. In Abbildung 6.6 sind die Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung bei den Frequenzen $f = 0,156$ Hz, 1,25 Hz und 10 Hz für die 60-jährige Eiche (a-f, vgl. Kap. 6.2.1), die 150-jährige Eiche (g-l, vgl. Kap. 6.1.1) und die 350-jährige Eiche (m-r) dargestellt.

Während sich die innere Kernholzzone in den spezifischen Widerstandstomogrammen der jungen Eiche nur frequenzabhängig herausbildet, ist sie für die 150-jährige Eiche bei allen Frequenzen deutlich zu sehen.

Der 350-jährige Baum zeichnet sich im Gegensatz zu den anderen beiden durch sehr niedrige spezifische Widerstände aus (veränderte Farbskala in Abb. 6.6, das rot dargestellte Splintholz besitzt in etwa dieselben spezifischen Widerstandswerte wie der blau dargestellte Splintholzbereich der 60- und 150-jährige Eiche). Im Inneren des alten Baumes zeigt sich ein großer Bereich mit sehr niedrigen spezifischen Widerständen (um $15 \Omega\text{m}$). Das deutet auf Pilzbefall hin, der bei so alten Bäumen häufig ist. Um das zu überprüfen, wurde an diesem Baum zusätzlich eine Schalltomographie durchgeführt. Das Schalltomogramm ist im Anhang (Abb. C) zu sehen. Dort ist eine Schädigung im Zentrum zu erkennen, die nahelegt, dass die Festigkeit des Holzes an dieser Stelle beeinträchtigt ist. Diese Schädigung erreicht aber nicht das räumliche Ausmaß der gutleitenden inneren Zone in den spezifischen Widerstandsdaten (m, o, q). Vermutlich treten an dieser alten Eiche zwei Effekte auf. Zum einen dehnt sich die gutleitende Zone im Zentrum einer Eiche mit zunehmenden Alter aus, da immer mehr Rückgriffsstoffe im Kernholz eingelagert werden. Zum anderen setzt der Pilz den spezifischen Widerstand ebenfalls stark herab.

In der Darstellung der Phasenverschiebung zeichnet sich gleichfalls mit zunehmendem Alter eine Vergrößerung der niedrigphasigen Zone im Inneren ab (b, h). Für die alte

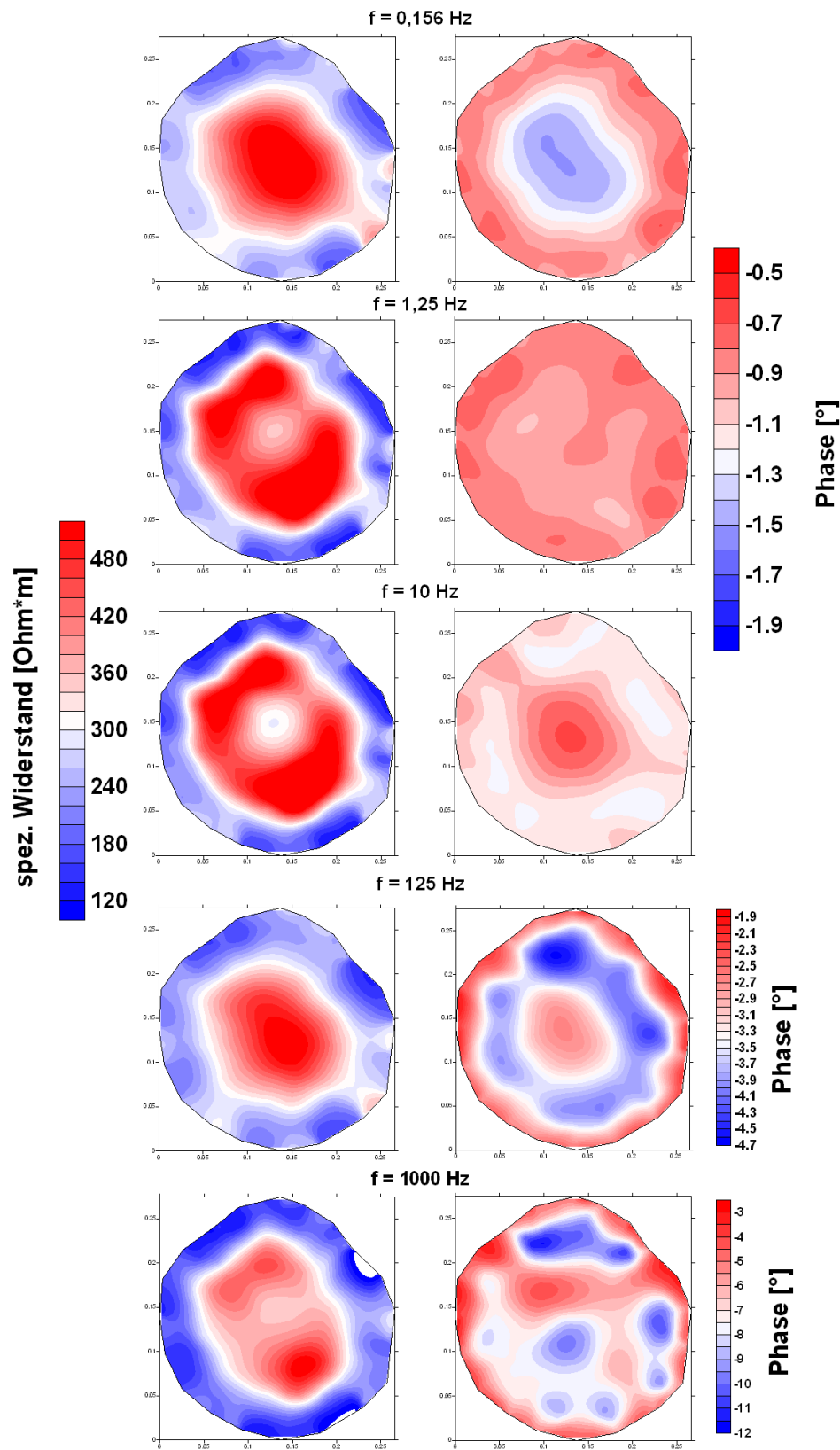


Abbildung 6.5: Frequenzabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung für eine gesunde, 60-jährige Eiche im Sommer 2008. Achtung: für $f = 125$ Hz und für $f = 1000$ Hz ändert sich die Farbskala der Phase.

Eiche ist diese Zone sehr groß (n), was zum Teil auch durch den Pilzbefall bedingt ist.

Aus den hier dargestellten Ergebnissen lässt sich erkennen, wie die Tomogramme gesunder Eichen verschiedener Altersstufen zu verschiedenen Jahreszeiten normalerweise aussehen könnten. Sie bilden die Grundlage für Vergleiche bei weiteren Messungen, die an pilzbefallenen Eichen vorgenommen wurden.

Vergleich von Eichen verschiedener Alter, BAM Testgelände, Juni 2008

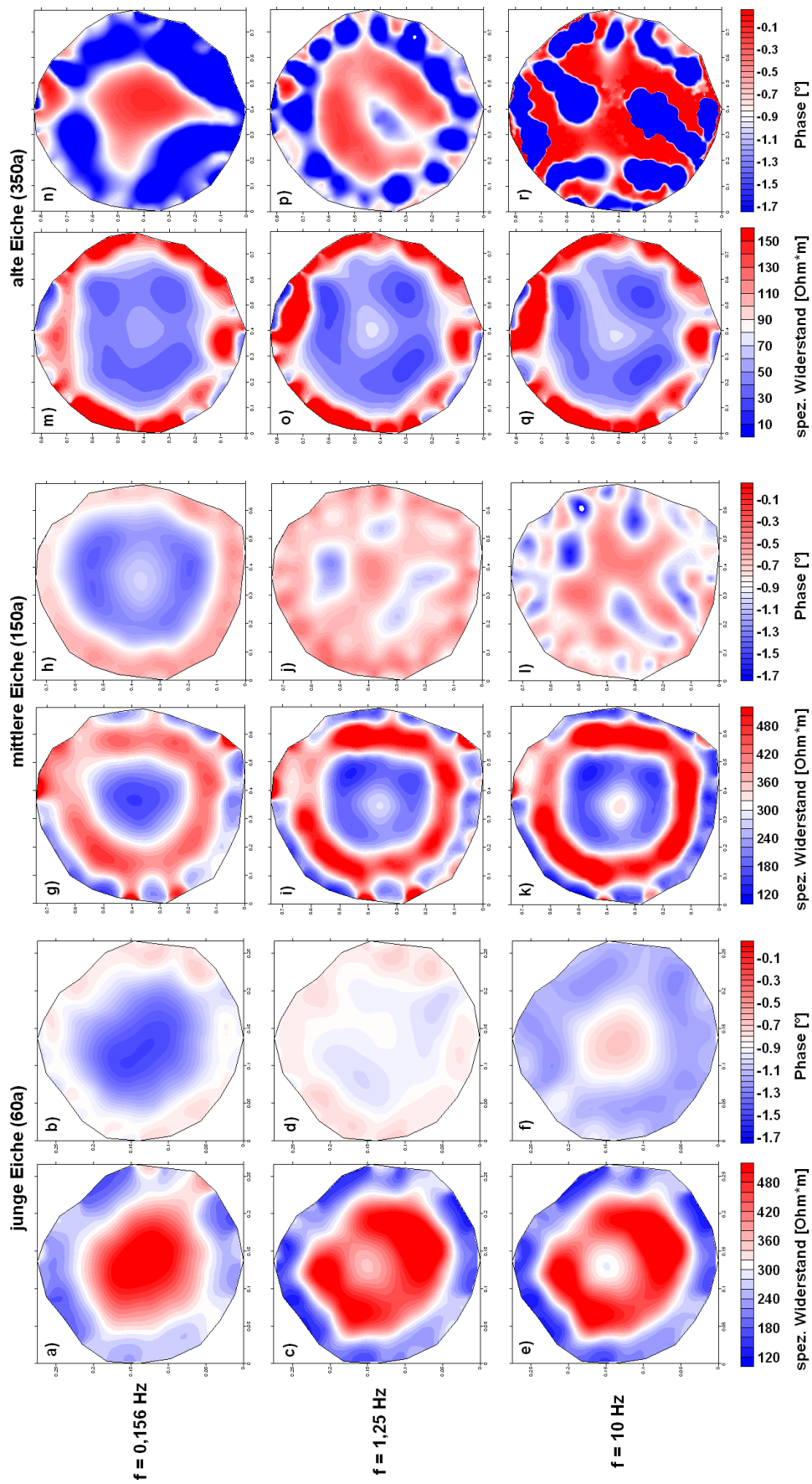


Abbildung 6.6: Tomogramme des spezifische Widerstands und der Phasenverschiebung von Eichen verschiedenen Alters bei unterschiedlichen Frequenzen. Da die 350-jährige Eiche sehr niedrige spezifische Widerstände aufweist (m, o, q), musste eine eigene Farbskala angewendet werden!

6.3 Eiche Nr. 1 - Pilzbefall, Vergleich Feld- mit Labordaten

Im Dezember 2007 wurden Messungen im Löwenberger Land (Brandenburg) an einer ca. 120-jährigen Eiche (*Quercus robur*) durchgeführt. Durch einen Anfahrschaden kam es zu einem Schwefelporlingsbefall (*Laetiporus sulphureus*) im unteren Stammabschnitt. In zwei Messebenen ($h_1 \approx 0,90$ m, Höhe Anfahrtsschaden, $h_2 \approx 1,80$ m, Höhe über Anfahrtsschaden) wurde mit 24 Elektroden in der Dipol-Dipol-Auslage bei $f = 1,25$ Hz und $f = 0,312$ Hz gemessen (siehe Abbildung 6.7). Einige Tage später wurde dieser Baum gefällt und für die Labormessungen in Teilen an die BAM gebracht (vergleiche dazu auch Laborkapitel 5.4.2). In der zweiten Messebene wurde nach einer Lagerung von vier Wochen die Tomographiemessung wiederholt. Anschließend wurden entlang zweier Querprofile Proben entnommen und im Labor untersucht.

In Abbildung 6.8 sind die Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase aus beiden Messebenen für die Frequenz $f = 0,312$ Hz dargestellt. Zusätzlich sind die kurz nach der Fällung aufgenommenen Fotos der Messebenen abgebildet. Auf diesen ist die durch den Pilz verursachte Verfärbung des Kernholzes deutlich sichtbar. Im spezifischen Widerstand beider Ebenen ist dieser Bereich durch niedrige spezifische Widerstände gekennzeichnet. Dies deutet auf einen aktiven Pilzbefall hin. Die Randzonen mit den hohen spezifischen Widerständen liegen in dem für die Winterjahreszeit typischen Bereich. An diesen Stellen ist kein Pilzbefall erkennbar. Dieser ringförmige hochohmige Bereich ist jedoch entlang des Anfahrschadens (Messebene 1), bzw. über dem Anfahrschaden (Messebene 2) unterbrochen. Dies bestätigt die Vermutung, dass der Pilz durch die große Wunde eingetreten ist und dort eine massive Schädigung verursacht hat.

Eine Abgrenzung des Pilzes innerhalb des inneren niedrigohmigen Bereichs ist nicht möglich, da, wie oben bereits festgestellt, älteres Eichenkernholz ebenfalls niedrige spezifische Widerstände im Inneren aufweist.

In der Phasendarstellung ist in der Mitte des Baumes eine breite Zone mit niedrigen Phasen (unter $-0,5^\circ$) erkennbar. In Messebene 1 ist diese Zone bis zum Baumrand über die Länge des Anfahrschadens zu sehen. Die niedrigen Phasen können ebenfalls eine

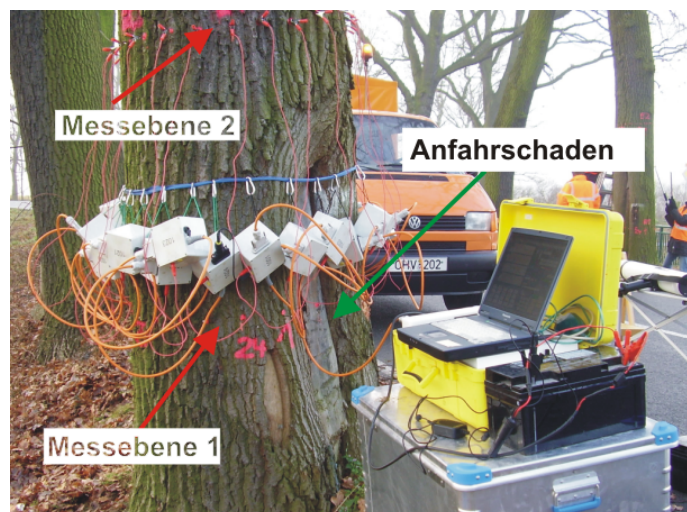


Abbildung 6.7: Foto des Messaufbaus an einer Eiche (Nr. 1) mit Anfahrschaden. Die Messungen fanden in zwei Ebenen statt.

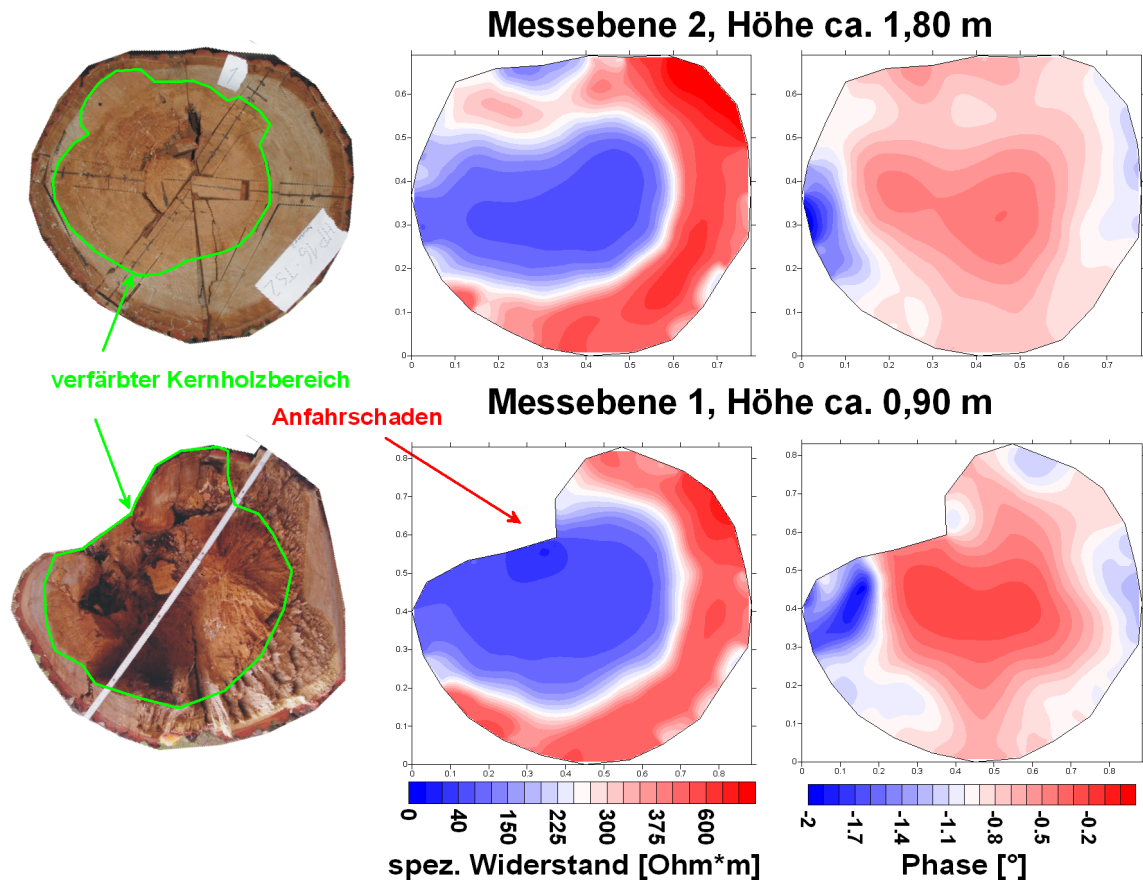


Abbildung 6.8: Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Foto (links) und Tomogramme des spezifischen Widerstands (mittig) und der Phase (rechts) für beide Messebenen ($f = 0,312 \text{ Hz}$). Der befallene Bereich stellt sich als niederohmige Anomalie im spezifischen Widerstand dar.

Indikation für Pilzbefall sein, da durch den Zellabbau die Polarisation sinkt (vgl. Ergebnisse aus Kapitel 5.3.1). In Ebene 2 ist dieser niedrigphasige Bereich noch relativ zentral. In dieser Ebene scheint sich der Pilz noch nicht so massiv ausgebreitet zu haben wie in der darunter liegenden Ebene 1.

In Kapitel 5.2 wurden im Labor Versuche zur Entsättigung durchgeführt. Um den Einfluss der Austrocknung an einem Stammabschnitt nach der Fällung zu untersuchen, wurden in Messebene 2 nach einer Lagerungszeit von vier Wochen erneut Messungen durchgeführt. Die Messebene befand sich auf halber Höhe des ca. 1 m hohen Stammstückes. Es ist davon auszugehen, dass die Austrocknung im Wesentlichen über die Stirnflächen des Baumes (also in axialer Richtung) erfolgte, da die noch intakte Rinde den Stamm vor Austrocknung in radialer Richtung schützt.

In Abbildung 6.9 sind für den spezifischen Widerstand und die Phase die Tomogramme vor und vier Wochen nach der Fällung gezeigt. Im spezifischen Widerstand ist deutlich die Austrocknung erkennbar. Auffällig ist der grün umrandete Bereich mit den niedrigen spezifischen Widerständen im gefällten Zustand. Anscheinend hat sich der Pilz bis

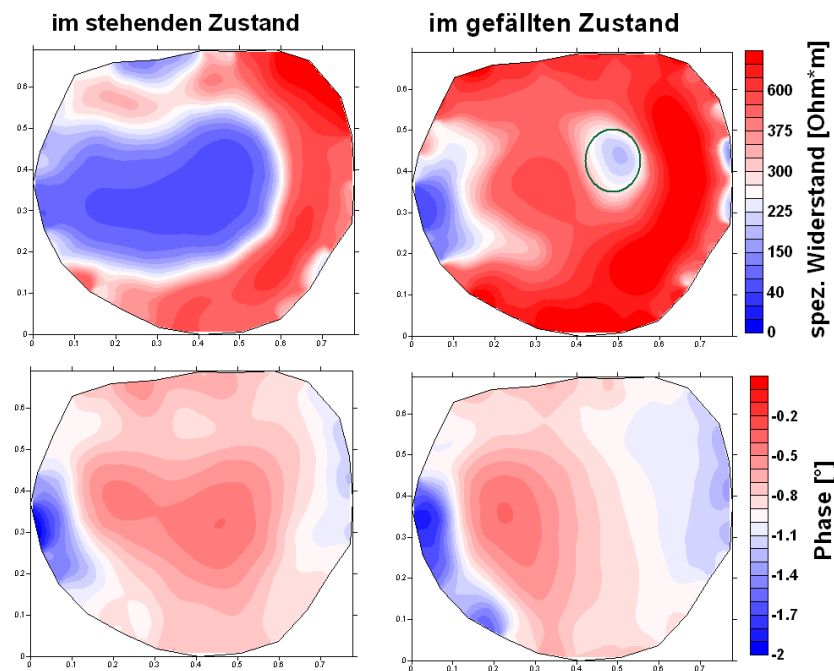


Abbildung 6.9: Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Vergleich der Tomographieergebnisse von Messebene 2 für $f = 0,312 \text{ Hz}$. Links die Messung am stehenden Baum (vgl. Abb. 6.8), rechts am selben Stammstück nach 4-wöchriger Trocknung an der Luft. Der am stärksten befallene Bereich zeichnet sich durch hohe spezifische Widerstände und niedrige Phasen aus.

dahin noch nicht ausgebreitet und der niederohmige Bereich ist eichentypisches älteres Kernholz mit den gut leitfähigen Einlagerungen.

In der Phase ändert sich das Tomogramm mit der Zeit geringfügiger. Der zentrale Bereich mit den niedrigen Phasen verschiebt sich nach der Fällung zum linken Rand hin. Dies ist der Bereich, in dem das Holz am stärksten geschädigt ist. Er korreliert mit dem Bereich der stärksten Austrocknung im spezifischen Widerstandstomogramm. Unklar ist die Ursache der gutleitfähigen Zone am linken Rand. Dort sind die Phasen in jedem Zustand sehr hoch (um -2°).

Nach der Messung im gefällten Zustand wurden aus dieser Messebene radiale und tangentiale Proben geschnitten und im Labor untersucht. In Abbildung 6.10 sind die Positionen der entnommenen Proben zu sehen. Die radialen Proben wurden entlang zweier Querprofile geschnitten. Beide führten durch den befallenen Teil des Holzes. Die tangentialen Proben wurden an verschiedenen Positionen entnommen. Nach den Messungen wurde die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Probenentnahme ermittelt.

Für die Frequenz $f = 0,312 \text{ Hz}$ sind die im Labor gemessenen Werte für den spezifischen Widerstand und die Phase zusammen mit der Holzfeuchte für alle Proben in Tabelle 6.3 aufgeführt. Erwartungsgemäß (vgl. Kapitel 5.1) liegen die spezifischen Widerstände der tangentialen Proben im Schnitt höher als für die radialen Proben. Die Proben aus dem befallenen Kernholzbereich (kursiv geschrieben) sind leitfähiger und weniger polarisierbar als Proben aus dem gesunden Teil des Kernholzes. Auffällig sind des Weiteren die Unterschiede in den Holzfeuchten zwischen den befallenen und unbe-

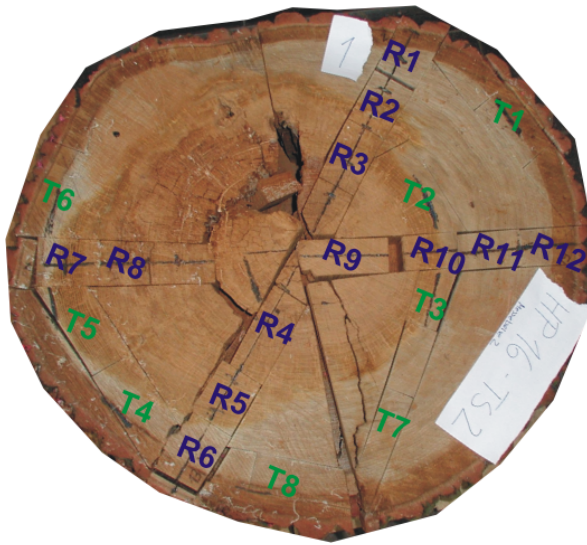


Abbildung 6.10: Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Foto von Messebene 2 mit Kennzeichnung der entnommen Probensegmente für die Labormessungen. Die durch den Pilz verursachte Kernholzverfärbung ist deutlich erkennbar.

Probe	ρ [Ωm]	φ [$^\circ$]	Feuchte [%]	Probe	ρ [Ωm]	φ [$^\circ$]	Feuchte [%]
R1	2091,91	-1,05	85,39	T1	3636,54	-0,60	97,27
<i>R2</i>	721,79	-0,70	76,41	<i>T2</i>	1539,58	-0,51	76,97
<i>R3</i>			52,98	<i>T3</i>	884,02	-0,44	68,67
<i>R4</i>			50,89	<i>T4</i>	3231,38	-0,64	71,95
<i>R5</i>	613,65	-0,63	51,16	<i>T5</i>	965,68	-0,50	56,42
R6	1627,63	-1,56	82,18	<i>T6</i>	2025,71	-0,43	78,22
<i>R7</i>	782,00	-2,58	61,70	T7	3416,69	-0,89	86,48
<i>R8</i>	128,20	-0,63	63,16	T8	3552,95	-1,03	89,09
<i>R9</i>	435,34	-0,49	46,02				
<i>R10</i>	543,23	-0,54	62,21				
R11	1219,29	-1,29	84,94				
R12	1524,12	-0,88	90,52				

Tabelle 6.1: Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Labormesswerte aus Messebene 2 für $f = 0,312$ Hz. Bei den kursiv dargestellten Proben war eine durch Pilzbefall verursachte Verfärbung sichtbar.

fallenen Proben. Während die gesunden Proben Holzfeuchten $> 80\%$ aufweisen (R1, R6, R11, T1, T7, T8), sind die Holzfeuchten der stark befallenen Proben (R3 - R5, R7 - R9, T3, T5) deutlich geringer. Dort setzte eher Austrocknung ein.

Ein Vergleich der Werte aus den Labormessungen mit den Tomographiemessungen im Gelände ist für die radialen Profile in Abbildung 6.11 dargestellt. Links das Profil der Proben R1 bis R6. Die Proben R3 und R4 waren nicht mehr im Labor messbar, da die Zersetzung des Holzes bereits zu stark vorangeschritten war. In Abbildung 6.11 rechts sind die Daten für das Profil der Proben R7 bis R12 dargestellt.

Abgesehen von einzelnen Ausnahmen zeigen die spezifischen Widerstände und die Phasen beider Profile ähnliche Verläufe. Allerdings sind die im Labor gemessenen spezifischen Widerstände insgesamt etwas höher, was durch die zusätzliche Austrocknung bedingt sein kann.

Damit lässt sich feststellen, dass die unter Feld- und Laborbedingungen gewonnen Er-

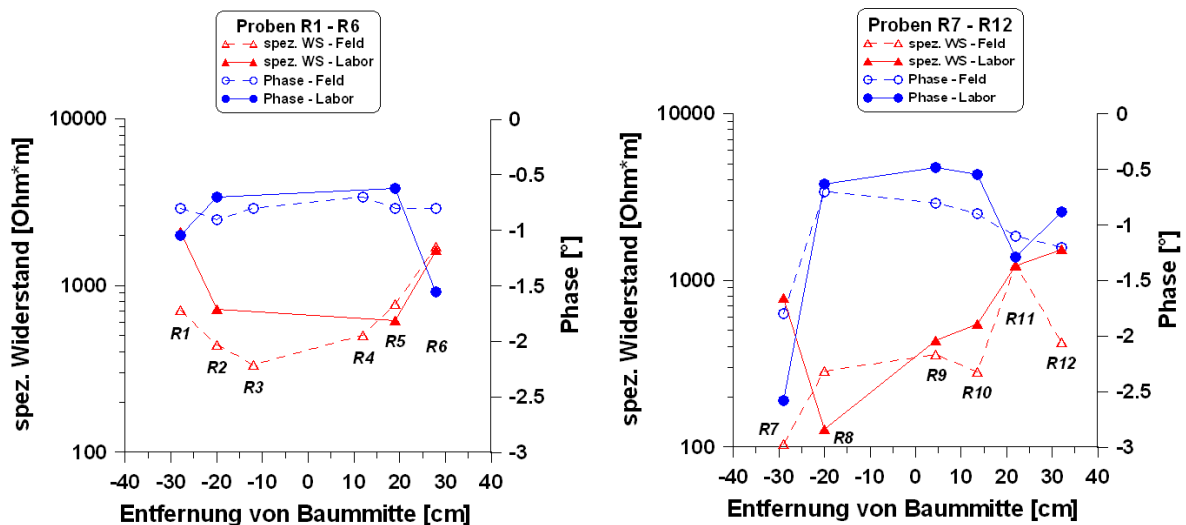


Abbildung 6.11: Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Vergleich zwischen den im Labor gemessenen Werten mit den Werten aus der Tomographiemessung, 4 Wochen nach der Fällung für $f = 0,312$ Hz. Links: Proben R1 bis R6, rechts: Proben R7 bis R12.

gebnisse vergleichbar sind. Die gemessenen Werte stimmten darüberhinaus auch mit dem visuellen Schädigungsgrad des Holzes überein.

6.4 Eiche Nr. 2 - Pilzbefall, Vergleich mit Schalltomographie

Im Juni 2008 wurde in Berlin-Wannsee an einer amerikanischen Sumpfeiche (*Quercus palustris*) in verschiedenen Höhen gemessen (Abb. 6.12). Ausgangspunkt war starker Pilzbefall am Wurzelansatz. SIP- und Schallmessungen wurden in 0,10 m (Messebene 1) und 1,60 m (Messebene 2) Höhe vorgenommen. Messebene 2 wurde unmittelbar nach der Fällung aufgeschnitten und daraus Proben zur Holzfeuchteermittlung entnommen.

In Messebene 1 wurde in einer Bipol-Dipol-Auslage gemessen, in Messebene 2 zusätzlich mit einer Dipol-Dipol-Auslage. In Abbildung 6.13 sind die Ergebnisse von Messebene 1 bei $f = 0,312$ Hz zu sehen. In dem oben links dargestellten Foto sind deutlich die durch den Pilz verursachten Verfärbungen zu sehen. Der zentrale Bereich war bereits stark geschädigt. Das Holz hatte an dieser Stelle kaum noch Festigkeit. In dem Schallbild (oben rechts) wird dieses Gebiet als zerstörtes Holz angezeigt (blaue Farben). Die Einteilung der Farbskala im Schalltomogramm geschieht zwischen den Farbgruppen Braun/Grün/Blau-Violett (vgl. Kap. 2.7.3 - Schallverfahren). Dabei wird die Farbe Braun als gesundes, festes Holz definiert, Grün als leicht geschädigter Bereich und Blau-Violett als bereits stark zersetztes Holz mit verminderter Festigkeit. Das angezeigte Gebiet stimmt im Wesentlichen mit den sichtbaren Schädigungen überein.

Im spezifischen Widerstand ist an derselben Stelle eine ausgeprägte Anomalie mit niedrigen spezifischen Widerständen zu sehen. Der normalerweise sichtbare hochohmige, äußere Ring ist weitgehend zerstört und nur rechts oben noch zum Teil erhalten.

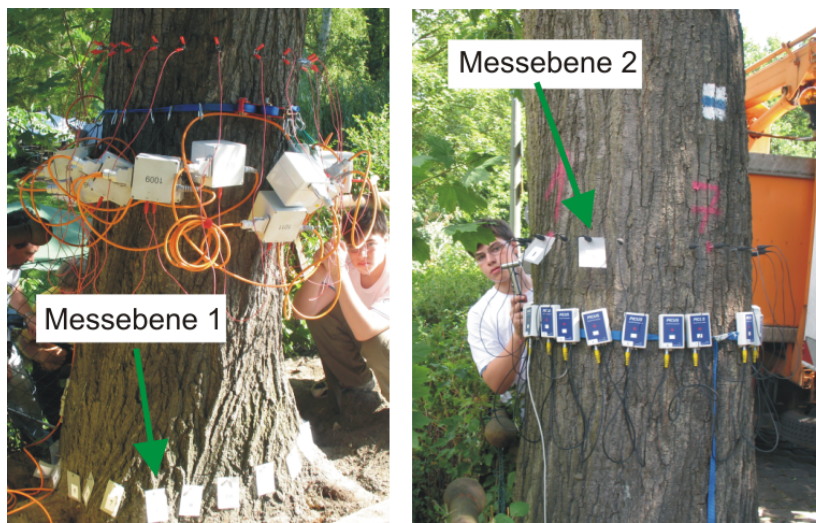


Abbildung 6.12: Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Fotos des Messaufbaus. In beiden Messebenen wurden SIP- (linkes Bild) und Schallmessungen (rechtes Bild) durchgeführt.

Im Phasentomogramm ist die ringförmige Struktur ebenfalls gestört. Statt der erwarteten niedrigen Phasenwerte ist an der Stelle des massivsten Pilzbefalls eine hochphasige Anomalie zu sehen (bis $-1,55^\circ$). Ähnliches wurde auch schon im vorigen Beispiel (Abb. 6.9) sichtbar. Auch dort waren am Rand des stärksten Pilzbefalls niedrige spezifische Widerstände, aber sehr hohe Phasen zu beobachten. Die pilzbedingte niedrigphasige Anomalie in Abbildung 6.13 befindet sich dagegen rechts oben im Bereich der hohen spezifischen Widerstände.

Die Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase aus Messebene 1 erscheinen allgemein als stark geglättet. Die Messwerte bei dieser Messung waren besonders fehlerbehaftet aufgrund Apparaturprobleme. Daher mussten vor der Inversion aus dem sowieso schon kleinem Datensatz (Bipol-Dipol, 160 Datenpunkte) noch viele Messwerte (ca. 60 Datenpunkte) entfernt werden. Die Interpretationsbasis ist bei solch einem Datensatzes sehr gering. Zusätzlich hat die Dreidimensionalität bei dieser Messung einen starken Einfluss, da die Messung kurz über dem Boden stattfand. Dies wurde in der Inversion nicht berücksichtigt. Damit sind eigentlich keine gesicherten Aussagen über den Zustand des Baumes in dieser Höhe möglich.

Die Tomogramme für Messebene 2 bei $f = 0,312 \text{ Hz}$ sind für die Dipol-Dipol-Auslage in Abbildung 6.14 zu sehen. Spezifischer Widerstand und Phase zeigen typische Werte eines gesunden Baumes zur Sommerzeit. Die ringförmige Struktur ist sichtbar und die Größenordnung der Werte ($50 \Omega\text{m} - 400 \Omega\text{m}$) liegen in demselben Bereich wie die der gesunden Referenzreihe. Die Phasen liegen zwischen $-0,6^\circ$ und -1° . Im Gegensatz dazu zeigt das Schalltomogramm einen geschädigten Bereich im Zentrum des Baumes an. Nach der Fällung zeigte sich, dass der Baum in dieser Höhe keinen Pilzbefall aufwies, dafür aber einen Riss im innersten Kernholzbereich. Dies erklärt den anormalen Bereich im Schalltomogramm. Die Schallwellen können den Riss nicht überwinden sondern laufen außen um ihn herum. Die dadurch verlängerte Schalllaufzeit wird als Fehlstelle im Baum angezeigt. Dadurch kommt es zu Fehlinterpretationen der Schalltomogramme.

Im Laborkapitel 5.1 wurden für die untersuchten Proben eine Abhängigkeit des spezifischen Widerstands und der Phase vom Probenort innerhalb des Kernholzes festgestellt. Auch in den Tomogrammen von gesunden Eichen ist diese Abhängigkeit zu sehen (ringförmige Struktur). Um die Holzfeuchten in diesen Bereichen zu untersuchen,

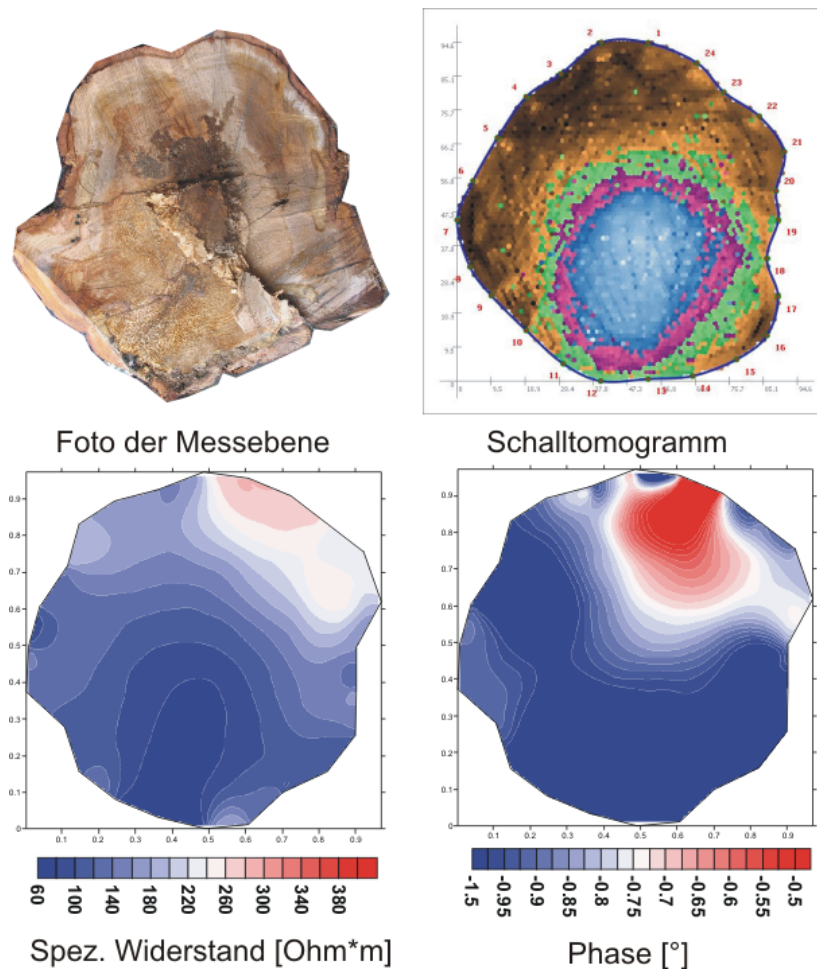


Abbildung 6.13: Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für $f = 0,312 \text{ Hz}$ sowie von der Schallmessung für Messebene 1. Im Vergleich dazu das unmittelbar nach der Fällung aufgenommene Foto.

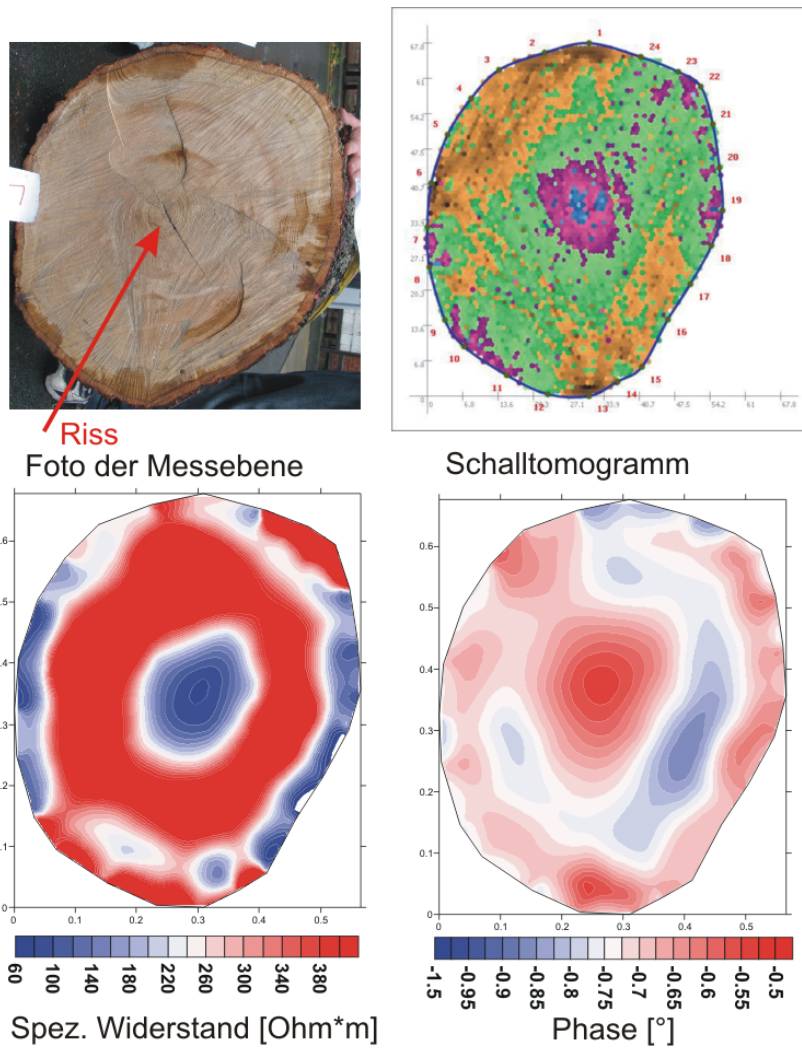


Abbildung 6.14: Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für $f=0,312\text{ Hz}$ sowie von der Schallmessung für Messebene 2. Im Vergleich dazu das unmittelbar nach der Fällung aufgenommene Foto.

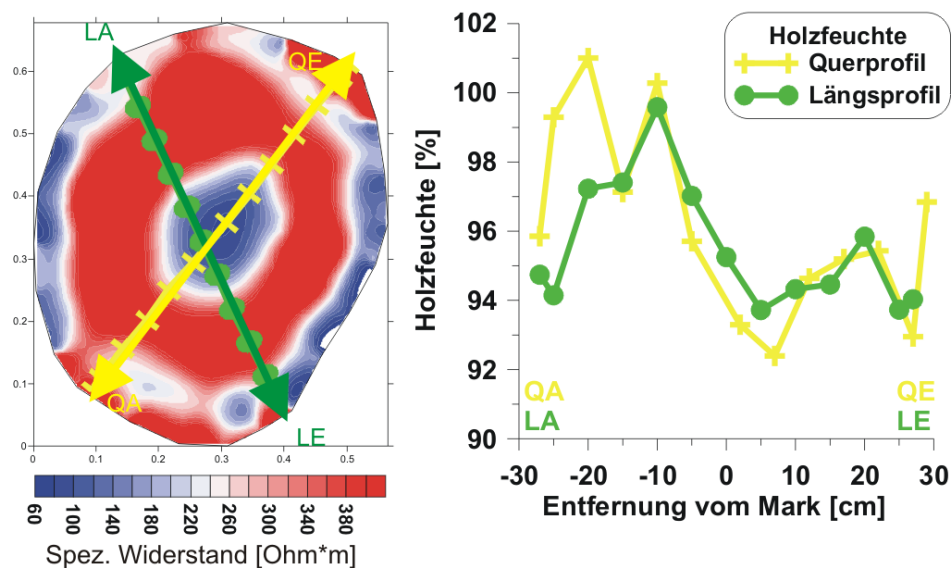


Abbildung 6.15: Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Probenentnahme und Holzfeuchte aus Messebene 2. Die grundsätzlich sehr hohe Holzfeuchte verringert sich zum inneren Kernholz hin.

wurden aus der gesunden Messebene 2 unmittelbar nach der Fällung Proben entlang zweier Profile geschnitten und die Holzfeuchte bestimmt (siehe Abb. 6.15). Diese Eiche wies grundsätzlich hohe Holzfeuchte von $>90\%$ auf. Der innere Kernholzbereich hatte gegenüber dem äußeren Kernholzbereich einen etwas geringeren Wassergehalt. Die äußeren Kernholzbereiche weisen aber wesentlich höhere spezifische Widerstände auf als die innersten Kernholzbereiche. Diese Werte können damit nicht durch den Wassergehalt erklärt werden, sondern sind ein weiterer Beleg für die Abnahme des spezifischen Widerstands durch die Einlagerungen gut leitender Substanzen (phenolische Stoffe, Gerbsäuren).

6.5 Eiche Nr. 3 - Pilzbefall, Vergleich mit Bohrwiderstand

Im September 2007 wurde an einer ca. 150-jährigen Roteiche (*Quercus rubra*) in Berlin-Steglitz gemessen. Am Stammfuß der Eiche befand sich ein Riss, durch den der (unbestimmte) Pilz zu sehen war. Dabei wurde das SIP-Verfahren und das Bohrwiderstandsverfahren (BWS) eingesetzt. Nach der Fällung konnten Bilder der Messebenen in den Vergleich miteinbezogen werden.

Um die Ausbreitung des Pilzes sowohl in radialer als auch in axialer Richtung zu bestimmen, wurden drei Messebenen ($h_1 \approx 0,20\text{ m}$, $h_2 \approx 1,40\text{ m}$, $h_3 \approx 3,00\text{ m}$) untersucht (Abb. 6.16). Mit 24 Elektroden wurde in Dipol-Dipol-Auslage bei $f = 1,25\text{ Hz}$ und $f = 0,156\text{ Hz}$ gemessen.

Die Ergebnisse der drei Messebenen für $f = 0,156\text{ Hz}$ sind in Abbildung 6.17 dar-



Abbildung 6.16: Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Fotos des Messaufbaus. Die Messungen fanden in drei Ebenen mit dem SIP-Verfahren und dem Bohrwiderstandsverfahren statt.

gestellt. Bilder a, c und e zeigen den spezifischen Widerstand, Bilder b, d und f die Phasenverschiebung in den jeweiligen Ebenen.

Deutlich ist in Messebene 1 (a) eine sehr gut leitfähige, weit ausgedehnte Zone im Inneren des Baumes mit spezifischen Widerständen unter $50 \Omega\text{m}$ zu sehen. Die für diese Jahreszeit typische Ringstruktur mit der äußeren, schlecht leitenden Zone ist unterbrochen. Die niedrigsten spezifischen Widerstände finden sich in Richtung des nach außen sichtbaren Risses. Dies scheint die Eintrittsstelle des Pilzes gewesen zu sein. Im Tomogramm des spezifischen Widerstands ist eine Unterscheidung zwischen der durch den Pilz verursachten Anomalie und der in gesunden Eichen auftretenden gut leitfähigen Zone im Zentrum des Baumes schwierig.

Im zugehörigen Phasentomogramm (Abb. 6.17 b) ist der konzentrische Aufbau von gesunden Eichen noch ansatzweise erkennbar. Allerdings ist die Ringstruktur ebenfalls unterbrochen. Eine genaue Interpretation beider Tomogramme ist schwierig, da Pilzbefall sowohl niedrige spezifische Widerstände als auch niedrige Phasen verursacht. Hinzu kommt der große Einfluss der Dreidimensionalität in dieser Höhe. Ein Hinweis auf Schädigung durch Pilzbefall ist jedoch generell das Abweichen des Aufbaus von der konzentrischen Ringstruktur. Ansätze davon sind sowohl im spezifischen Widerstand als auch in der Phase erkennbar.

In Messebene 2 ist diese Abweichung deutlich zu sehen. Im spezifischen Widerstand (Abb. 6.17 c) und in der Phase (Abb. 6.17 d) ist der konzentrische Aufbau stark gestört. Im spezifischen Widerstand ist in dezentraler Lage eine Anomalie mit sehr hohen Widerstandswerten zu sehen. Parallel dazu sind die spezifischen Widerstände um diese Anomalie herum sehr niedrig. Die Phasen sinken in diesem Bereich bis beinahe 0° . Nur am rechten Rand scheinen Reste der Ringstruktur erhalten zu sein. Diese beiden Tomogramme deuten auf sehr starken Pilzbefall in Messebene 2 hin. Vermutlich ist der Holzabbau in einigen Bereichen schon sehr weit fortgeschritten.

Die Tomogramme aus der dritten Messebene sehen dagegen typisch für einen gesunden Stammabschnitt zu dieser Jahreszeit aus. Die Ringstruktur ist sowohl im spezifi-

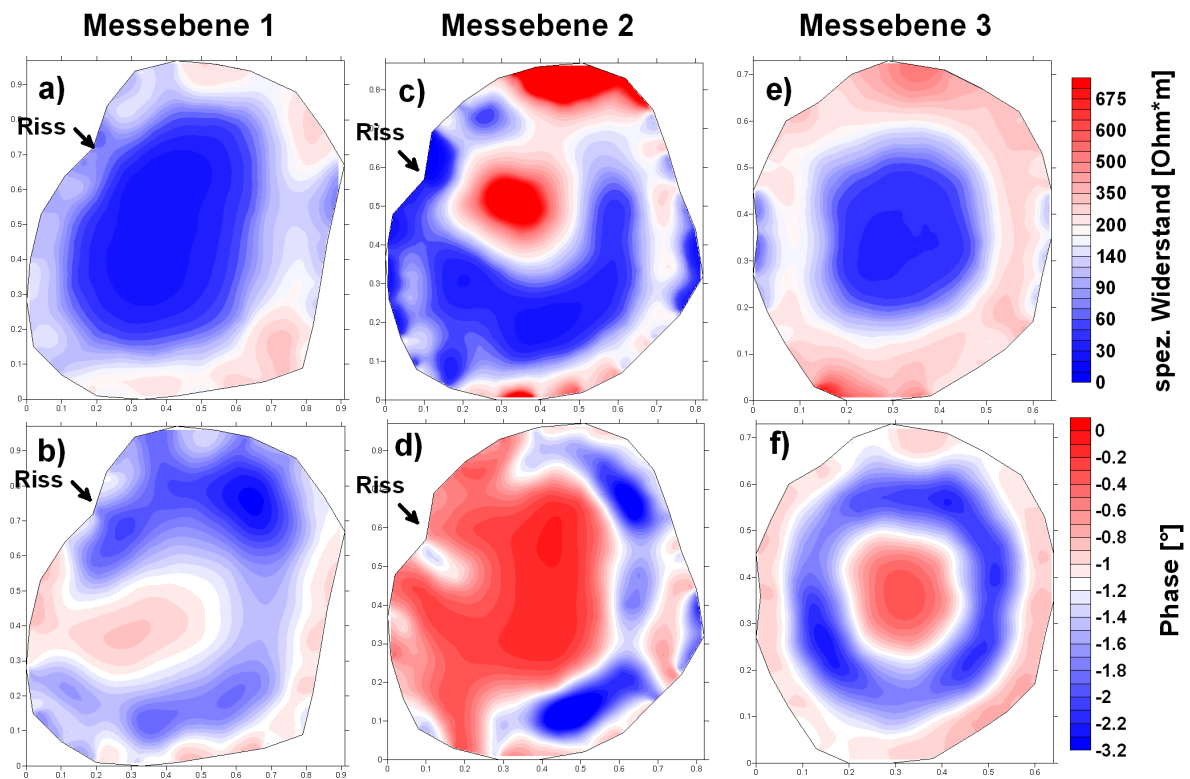


Abbildung 6.17: Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Spezifischer Widerstand (a, c, e) und Phasentomogramme (b, d, f) für die drei Messebenen bei $f = 0,156$ Hz.

schen Widerstand (Abb. 6.17 e) als auch in der Phase (Abb. 6.17 f) vorhanden. Aus den sechs Tomogrammen lässt sich schließen, dass der Pilz durch den Riss in etwa der Höhe der zweiten Messebene in den Baum eingedrungen ist. Dort ist der Holzabbau am stärksten fortgeschritten, vermutlich in Teilen sogar bis zur völligen Holzzerstörung (Hohlstelle). In darunter liegender Messbene 1 scheint er sich auch auszubreiten, allerdings nicht so stark. In Messebene 3 ist der Pilz (noch) nicht angekommen, da dort die Tomogramme ein für diese Jahreszeit typischen gesunden Stammabschnitt zeigen.

Zusätzlich zu den SIP-Messungen fanden Bohrwiderstandsmessungen (BWS) statt. In der Praxis werden nur wenige Messungen an einem Baum durchgeführt (vgl. dazu Kapitel 2.7.2 - Bohrwiderstand). Im Hinblick auf die ohnehin anstehende Fällung des Baumes und zwecks der besseren Vergleichbarkeit wurden jedoch an jeder SIP-Elektrodenposition BWS-Messungen vorgenommen. Die Ergebnisse für Messebene 2 sind in Abbildung 6.18 zusammen mit einem Foto und den SIP-Daten zu sehen. Bei der Darstellung der BWS-Daten wurde davon ausgegangen, dass die Bohrnadel senkrecht zur Oberfläche in den Holzkörper eindringt. Dies ist jedoch in der Praxis nicht immer der Fall. Vielmehr driftet die Nadel. Dies kann jedoch i. d. R. am lebenden Baum nicht rekonstruiert werden.

Auf dem Foto (Abb. 6.18a) ist deutlich eine Hohlstelle im Zentrum erkennbar. Diese hat die hohen spezifischen Widerstände im Tomogramm (c) verursacht. Des Weiteren ist auch eine leichte Verfärbung rund um die Hohlstelle zu erkennen. Die nicht ver-

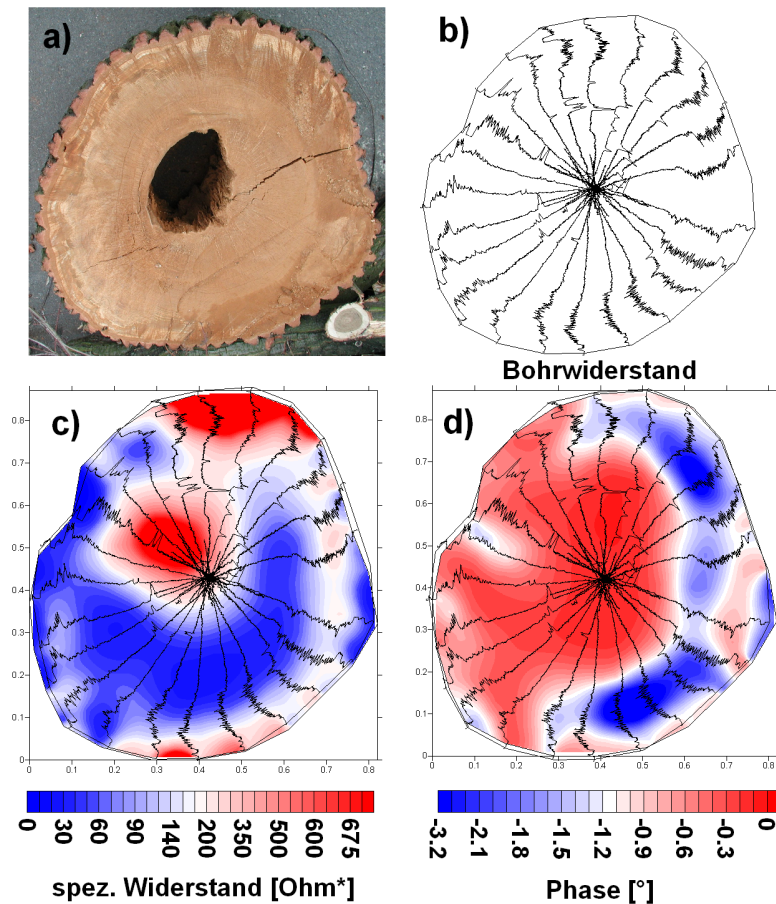


Abbildung 6.18: Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Foto der Messebene 2 (a), Bohrwiderstandsdaten (b) sowie die Daten des spezifischen Widerstands(c) und der Phasenverschiebung (d) zum Vergleich.

färbten Bereiche (rechts am Rand) korrelieren gut mit den als gesund angesprochenen Zonen aus den spezifischen Widerstands- und Phasendaten.

Im Bohrwiderstand (b) ist jeweils im Splintholzbereich und in Höhe der ersten Jahrringe ein Amplitudenanstieg zu sehen. Im Inneren des Baumes fällt dieser jedoch schnell ab. Bereiche verminderter Holzfestigkeit lassen sich demnach im Zentrum des Baumes feststellen. Der rechte Rand des Baumes weist im Gegensatz zum linken Rand (Nähe Riss) mehr festes Holz auf.

Werden die BWS-Daten über die spezifischen Widerstands- (c) und Phasentomogramme (d) gelegt, stimmen die Bereiche höherer Holzfestigkeiten mit den Bereichen intakter Ringstruktur in etwa überein. Abweichungen können sich durch die nicht korrekten Wiedergaben des Bohrkanals und die Wahl der Farbskala erklären lassen. Beim Vergleich des Fotos mit dem spezifischen Widerstandstomogrammen ist zu entnehmen, dass die Zone der Verfärbungen mit der leitfähigen Anomalie korreliert.

6.6 Erkenntnisse aus den Feldmessungen

In diesem Kapitel wurde die Anwendung des SIP-Verfahrens an stehenden Eichen gezeigt. Angefangen wurde mit einem gesunden, ca. 150-jährigen Baum. An dieser Referenzreihe konnte der Aufbau von gesunden Eichen nachvollzogen werden. Er zeichnet sich generell durch konzentrische, ringförmige Strukturen aus. Dabei sind im spezifischen Widerstands- und Phasentomogramm der wasserführende Splintholzbereich vom trockeneren Kernholzbereich unterscheidbar. Der Splintholzbereich wird als Ring niedriger spezifischer Widerstände dargestellt. Der darauf folgende höherohmige Ring kennzeichnet den trockeneren Kernholzbereich. Adulte Eichen besitzen im innersten Kernholzbereich eine Zone mit sehr niedrigen spezifischen Widerständen, die nicht durch den Wassergehalt erklärt werden können. Diese Leitfähigkeiten resultieren vermutlich aus den gutleitfähigen, eingelagerten Substanzen (phenolische Stoffe, Gerbsäuren, vgl. dazu Kapitel 2.4.3, 2.6, 5.1).

Im Phasentomogramm ist ebenfalls eine konzentrische, ringförmige Anordnung erkennbar. Der Splintholz- und angrenzende Kernholzbereich ist gekennzeichnet durch niedrige Phasen. Das innere Kernholz zeichnet sich hingegen durch einen Ring hoher Phasen aus. Im Zentrum des Baumes ist analog zum spezifischen Widerstand eine Zone mit niedrigeren Phasen erkennbar.

Die jahreszeitlichen Veränderungen machen sich in den elektrischen Messungen stark bemerkbar. Das liegt zum einen an der Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften von der Temperatur (vgl. Kapitel 2.4.3). Hauptursache ist jedoch der jahreszeitlich veränderte Feuchtetransport innerhalb des Baumes. In der Winterperiode ist damit der Splintholzbereich des Baumes elektrisch nicht mehr vom Kernholzbereich zu unterscheiden. Im Phasentomogramm ist ebenfalls eine Änderung zwischen den Sommer- und Wintermessungen zu sehen. Im Sommer ist die innere Zone niedriger Phasen scheinbar kleiner als im Winter. Dafür ist der äußere, niedrigphasige Ring im Sommer ausgeprägter. Auch auf den Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit wirken sich die saisonalen Veränderungen aus.

Messungen an Eichen verschiedenen Alters zeigten grundsätzlich ähnliche Ergebnisse (Ringstruktur). Es konnte jedoch beobachtet werden, dass mit zunehmenden Baumalter die durch Einlagerungen bedingte, gut leitfähige Zone im Inneren des Baumes größer wird.

Ausgehend von den Tomogrammen gesunder Eichen, können die Tomogramme pilzbefallener Eichen interpretiert werden. Drei Beispiele von Messungen an Eichen mit unterschiedlichem Pilzbefall wurden dazu vorgestellt. Die Messergebnisse konnten darüber hinaus mit anderen Verfahren verglichen werden.

Der Einfluss von Pilzbefall wird in den elektrischen Tomogrammen durch eine Zerstörung der konzentrischen Ringstruktur deutlich. Dort, wo Pilzbefall auftritt, ist die ringförmige Struktur unterbrochen. Im Allgemeinen ist Pilzbefall gekennzeichnet durch niedrige spezifische Widerstände, da der Pilz aufgrund seines wasserreichen Gewebes einen guten Leiter darstellt (*Hanskötter* (2003)). Des Weiteren äußert er sich durch ein Herabsetzen der Phase, die mit der Zerstörung der Holzzellwände einhergeht. Im Endstadium des Pilzbefalls werden die entstandenen Hohlstellen durch einen Bereich sehr hoher spezifischer Widerstände und niedriger Phasen wiedergegeben.

In den Feldmessungen zeigte sich, dass es mit dem SIP-Verfahren möglich ist, Pilzbe-

fall zu erkennen. Es ist jedoch zum Teil schwierig, die genauen Abmaße der infizierten Bereiche abzugrenzen, da älteres, gesundes Eichenkernholz ähnliche elektrischen Eigenschaften aufweist wie pilzinfectiertes Holz.

Da der spezifische Widerstand stark auf die Holzfeuchte reagiert, ist es gegenüber anderen Tomographieverfahren möglich, Aussagen über den Saftfluss und damit indirekt über den Feuchtezustand des Baumes zu machen. Aus der Phasenverschiebung sind des Weiteren Aussagen über die Schädigung der Holzzellen theoretisch denkbar. In tomographischer Anordnung am lebenden Baum ist dies derzeit aber noch nicht sicher möglich.

Die Schalltomographie wird im Wesentlichen beeinflusst von der Dichte und der Festigkeit des Holzes. Damit können ebenfalls Informationen über die Beschaffenheit des Baumes gewonnen werden. Im Allgemeinen gibt das Schalltomogramm den Zustand des Baumes hinsichtlich seiner Festigkeit gut wieder. Allerdings kann es bei kleinräumigen Störungen (z.B. Rissbildungen) zu einer fehlerhaft angezeigten Fehlstelle kommen.

Das in der Praxis oft eingesetzte Bohrwiderstandsverfahren lässt ebenfalls Aussagen über die Festigkeit des Holzes zu. Aufgrund der Schädigungen des Baumes durch die lange Bohrnadel sollte es aber nur sehr wenig eingesetzt werden (vgl. Kapitel 2.7.2) und liefert nur linienhafte Informationen. Dadurch hat es einen klaren Nachteil gegenüber den nichtinvasiven tomographischen Verfahren.

7 Zusammenfassung und Diskussion

Thema der Arbeit

Das Thema dieser Arbeit ist die Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichenkernholz und der tomographische Einsatz an stehenden Eichen. Zur Vorbereitung wurden zunächst Untersuchungen zu Tomographiemessungen an zylindrischen Körpern vorgenommen. Anschließend sind Labormessungen an Eichenkernholzproben und Tomographiemessungen an stehenden Eichen durchgeführt worden.

Voruntersuchungen am zylindrischen Probekörper

Die vorbereitenden Untersuchungen (Kapitel 4) zeigten, dass tomographische Messungen durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Für die Baummessungen standen dabei die Elektrodenart, das Elektrodenmaterial sowie die Ankopplung der Elektroden an den Baum im Vordergrund. Nach eigenen Versuchen und den Erkenntnissen anderer Autoren sowie auf Grundlage der Praxistauglichkeit wurden bei den späteren Feldmessungen handelsübliche Stahlnägel genutzt. Für Versuche, bei denen die Elektroden gleichzeitig als Sensoren für die Schalltomographie genutzt wurden, sind Stahlnägel mit einem möglichst breiten und flachen Kopf (Dachpappennägel) verwendet worden. Um eine gute Ankopplung zu gewährleisten, mussten die als Elektroden genutzten Nägel durch die Rinde bis in den ersten Jahrring des Baumes geschlagen werden. Die Übergangswiderstände lagen dann für gewöhnlich im einstelligen $k\Omega$ -Bereich.

Neben den Elektroden spielt bei geoelektrischen Untersuchungen die Elektrodenkonfiguration eine Rolle. Bei tomographischen Messungen an zylindrischen Holzkörpern wurde bisher überwiegend die Dipol-Dipol-Auslage genutzt (*Just* (2002), *Hanskötter* (2003), *al Hagrey* (2006)). Sie liefert eine sehr gute Auflösung, ist aber für spektrale IP-Messungen sehr zeitraubend. Daher wurde eine neuentwickelte Bipol-Dipol-Auslage für zylindrische Probekörper vorgestellt, die aufgrund der geringeren Anzahl von Anordnungen wesentlich schneller misst. Bei dieser Auslage liegen die Stromelektroden nicht mehr nebeneinander, sondern stehen sich gegenüber bzw. 90° zueinander. Dadurch wird ein Stromfluss durch die Mitte des Probekörpers erzwungen. Testmessungen mit dieser Auslage zeigten, dass sie für tomographische Aufnahmen gut geeignet ist. Allerdings ist die Auflösung nicht ganz so gut wie bei der Dipol-Dipol-Auslage, was sich vor allem bei geringerer Messqualität bemerkbar macht.

Der Unterschied zwischen zwei- und dreidimensional ausgewerteten Daten ist bei den Messungen am Baum signifikant, wenn die Messungen dicht an der Erdoberfläche stattfinden. Dann werden die Daten durch den nahen Erdboden verfälscht. Eine Korrektur

ist nur dann vernachlässigbar, wenn das Verhältnis von der Länge des Probekörpers zu seinem Radius 1,5 übersteigt. In den Feldmessungen war das deutlich zu sehen. Die Tomogramme der Messungen dicht an der Erdoberfläche waren weniger genau als die, die in einiger Höhe des Stammes durchgeführt wurden.

Labormessungen

Umfangreiche Laboruntersuchungen zum komplexen elektrischen Widerstand von Eichenkernholz sind bisher nicht bekannt. Um die Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung von Eichen richtig interpretieren zu können, ist es nötig, die elektrischen Eigenschaften von Eichenkernholz zu kennen. Dazu wurden Versuche zum Einfluss der Anisotropie, zur Holzfeuchte und zum Pilzbefall durchgeführt.

Eine grundlegende Eigenschaft aller Bäume ist die Anisotropie. Für die elektrischen Verfahren gibt es bereits Untersuchungen anderer Autoren (*Kollmann* (1951), *Shigo und Shigo* (1974), *Du* (1991)). Diese beschäftigen sich aber nur mit der elektrischen Leitfähigkeit. Der Einfluss der Anisotropie auf die Phasenverschiebung wurde bisher nicht untersucht.

Bei den in dieser Arbeit dazu durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass die Ergebnisse mit denen in der Literatur angegebenen Werte für den spezifischen Widerstand übereinstimmen. Bei den Eichenkernholzproben war der spezifische Widerstand in axialer Richtung am geringsten. In radialer Richtung war er 2-3 mal größer. In tangentialer Richtung war er mit einem Faktor 5-6 gegenüber der axialen Richtung am größten.

In der Phasenverschiebung zeigten sich ebenfalls deutlich Unterschiede zwischen den Richtungen. So hatten die axialen Proben das höchste Phasenmaximum (bis -2°) bei den niedrigsten Frequenzen (um 0,01 Hz). Demgegenüber ist die Phasenverschiebung bei den radialen Proben wesentlich weniger ausgeprägt. Die Phasenmaxima befinden sich um $-0,6^\circ$ bei einer Frequenz von 0,1 Hz. Für die tangentialen Proben war kein frequenzabhängiger Phaseneffekt feststellbar. Dort lagen die Phasenwerte über dem gesamten Frequenzspektrum um $-0,4^\circ$.

Die Anisotropie ist ebenfalls in der imaginären Leitfähigkeit zu sehen. Damit sind die Änderungen in der Phase nicht nur auf die gravierenden Änderungen im spezifischen Widerstand (und damit auf das Porenfluid) zurückzuführen, sondern auch auf die Grenzflächenprozesse an den Holzzellwänden.

Ursache für die Anisotropie der Bäume sind die strukturellen Unterschiede im Holzaufbau. In axialer Richtung, also in Richtung der Leitungsbahnen, ist die Ionenbeweglichkeit durch die fibrillären Strukturen der Zellulose wesentlich größer als in jede andere Richtung (*Du* (1991)). Daher ist der spezifische Widerstand dort am geringsten. Der Unterschied zwischen den radialen und tangentialen Proben sind auf die radial verlaufenden Holzstrahlen zurückzuführen, die einen geringen Ladungstransport in radialer Richtung ermöglichen. Dieser Aufbau wirkt sich auch auf die Grenzflächenprozesse aus. Die höchsten Phasen wurden in axialer Richtung gemessen. Dort sind die Poren am längsten. Die Phaseneffekte werden umso geringer, je kleiner die Poren in Ausbreitungsrichtung sind.

Den größten Einfluss auf den spezifischen Widerstand hat der Wassergehalt des Holzes (Holzfeuchte). Die Versuche an verschiedenen Eichenkernholzproben eines Baumes

haben gezeigt, dass der spezifische Widerstand mit zunehmender Holzfeuchte kontinuierlich abnimmt. Das wirkt sich auch auf die Phase aus. Bei Holzfeuchten über 50 % nimmt die Phase ab. Für Holzfeuchten unter 50 % zeigt sich eine Zunahme der Phase mit steigender Holzfeuchte. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten liegt in dem Sättigungsprozess der Holzzellen. Bei darrgetrocknetem Holz (Holzfeuchte = 0 %) befindet sich weder gebundenes Wasser in den Holzzellwänden, noch freies Wasser in den Lumen (Porenräumen) der Holzzellen. Bis zu einer Holzfeuchte von ca. 25 % (Fasersättigungsbereich von Eiche) füllen sich die Holzzellwände mit Wasser. Der freie Porenraum in der Holzzelle selbst ist aber noch nicht mit Wasser gefüllt. Dies geschieht oberhalb des Fasersättigungsbereichs. Bei Holzfeuchten > 25 % wird nach und nach der Porenraum der Holzzelle mit freiem Wasser gefüllt. Die Vorgänge im Fasersättigungsbereich können dabei fließend sein. So kann es bereits zur Ansammlung von freiem Wasser in der Holzzelle kommen, auch wenn die Holzzellwände noch nicht komplett mit Wasser gefüllt sind.

Die imaginäre Leitfähigkeit wird im Wesentlichen durch die Grenzflächenprozesse an den Holzzellwänden beeinflusst. Die reelle Leitfähigkeit wird durch das freie Wasser in der Holzzelle bestimmt. Bei niedrigen Holzfeuchten (< Fasersättigungsbereich) spielt damit vorwiegend die imaginäre Leitfähigkeit eine Rolle. Mit steigendem Wassergehalt in den Holzzellwänden erhöht sich die Phase. Sind die Holzzellwände gefüllt und das freie Wasser nimmt mit steigender Holzfeuchte zu, hat die reelle Leitfähigkeit einen immer größeren Einfluss auf die Gesamtleitfähigkeit und die Phase nimmt zu höheren Holzfeuchten hin ab.

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit war die Auswirkung von Pilzbefall auf den komplexen elektrischen Widerstand. Mit Hilfe zweier Langzeitversuche mit den braunfäuleerregenden Pilzen *Daedalea quercina* (Eichenwirrling) und *Laetiporus sulphureus* (Schwefelporling) konnte im Labor festgestellt werden, dass Pilzbefall im Anfangsstadium die spezifischen Widerstände stark herabsetzt, da der Pilz für seinen Stoffwechsel Wasser benötigt und durch sein wasserreiches Gewebe selbst einen guten elektrischen Leiter darstellt. Sind später alle relevanten Holzsubstanzen durch den Pilz abgebaut, beginnt das Holz auszutrocknen und es kommt zu einem starken Anstieg des spezifischen Widerstands.

Die Phase wird durch den Pilzbefall ebenfalls beeinflusst. Mit zunehmendem Pilzbefall wird die Phasenverschiebung geringer. Bei gesundem Holz liegen die Phasen (abhängig vom Ort) bei bis zu -2°. Je nach Zersetzungsgrad des Holzes strebt die Phase bei Holzbefall gegen 0°. Bei hohen Holzfeuchten ist dies durch den niedrigen spezifischen Widerstand bedingt. In den Experimenten zeigte sich aber, dass auch bei beginnender Austrocknung der Holzproben und den dadurch einsetzenden höheren spezifischen Widerständen die Phase weiterhin abnimmt. Das bedeutet, dass die Abnahme der Phasenwerte zwar durch die Leitfähigkeit des vorhandenen freien Wassers beeinflusst wird, die entscheidende Ursache der Phasenabnahme aber in den physiologischen Veränderungen der Holzzellwände liegt. Der große Vorteil der Phasenauswertung liegt damit in der Möglichkeit des Nachweises der Zerstörung des Holzzellaufbaus.

Diese Ergebnisse korrelieren mit denen von *Hanskötter* (2003). Sie stellte bei Pilzimpfungsversuchen an Rotbuchenproben (*Fagus sylvatica* L.) fest, dass die Abbautätigkeit holzzersetzender Pilze (*Pleurotes ostreatus*, *Coriolus versicolor* und *Poria placenta*) einen gravierenden Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit des Holzes hat. Mit zuneh-

mender Versuchsdauer nahm die elektrische Leitfähigkeit zu.

Auch am lebenden Baum konnten die Auswirkungen von Pilzbefall gezeigt werden. Bei Vergleichen von infizierten und gesunden Eichenkernholzproben zeigten sich deutlich die im Labor aufgetretenen Unterschiede im spezifischen Widerstand und der Phase. Gesundes Eichenkernholz weist wesentlich höhere spezifische Widerstände auf als infiziertes Holz. Dabei nimmt der Phaseneffekt deutlich ab, bis keine Phasenverschiebung mehr eintritt. Ein Phasenmaximum ist am infiziertem Holz nicht mehr eindeutig erkennbar.

Feldmessungen

Tomographische SIP-Messungen an stehenden Eichen wurden in Kapitel 6 beschrieben. Gesunde Eichen zeichnen sich in den Tomogrammen des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung durch ringförmige, konzentrische Strukturen aus. Der Aufbau ist dreigeteilt. Außen befindet sich ein Ring mit niedrigen spezifischen Widerständen. Dies ist im Wesentlichen das wasserführende Splintholz. Anschließend folgt ein breiter Ring hoher spezifischer Widerstände, der das trockenere Kernholz charakterisiert. Im Zentrum von adulten Eichen wird erneut eine Zone niedriger spezifischer Widerstände beobachtet.

In der Phase ist eine ähnliche dreigeteilte Anordnung zu sehen. Das Splint- und angrenzende Kernholz sind gekennzeichnet durch niedrige Phasen. Anschließend folgte ein breiter Ring hoher Phasen. Gesundes Kernholz ist demnach gut polarisierbar. Im Zentrum des Baumes nehmen die Phasen analog zum spezifischen Widerstand wieder ab. Diese Abnahme im älteren, gesunden Kernholz kann auf eine steigende Ionenkonzentration zurückgeführt werden. Die im Verkernungsprozess eingelagerten phenolischen Stoffe (Salze, Säuren) stellen eine Ionenquelle dar, die zu einer Verringerung des spezifischen Widerstands führen (*Piirto und Wilcox* (1978), *Wagenführ* (1999)). In der Phase verursachen die zusätzlichen Ionen ebenfalls eine Abnahme, da bei steigender Salinität die elektrische Leitung zum überwiegenden Teil durch den Porenraum und nicht mehr an den Grenzflächen stattfindet (*Breede* (2006), *Kruschwitz* (2007) an Sandsteinproben).

Die Frequenzabhängigkeit des komplexen elektrischen Widerstands ist am deutlichsten in der Phase erkennbar. Während sich die Strukturen im spezifischen Widerstand kaum ändern, werden die Tomogramme der Phase bei Frequenzen oberhalb von 1 Hz für gewöhnlich stark unstrukturiert. Das liegt daran, dass die Phasenmaxima von Eichenkernholz bei wesentlich niedrigeren Frequenzen liegen. Die im Labor gemessenen Spektren zeigten ihr Frequenzmaximum für die axialen Proben bei ca. $f = 0,01$ Hz und für die radialen Proben bei ca. $f = 0,1$ Hz. Idealerweise sind für Feldmessungen diese niedrigen Frequenzen zu wählen. Bei $f = 0,156$ Hz und $f = 0,312$ Hz sind in den gemessenen Tomogrammen die strukturiertesten Ergebnisse erzielt worden, da dort der Phasenkontrast am stärksten war und eine Interpretation überhaupt erst möglich erschien. Zusätzlich werden die Phasentomogramme bei höheren Frequenzen aufgrund der großen Sensibilität der Phase gegenüber externen Einflüssen wie Ankopplung und Polarisierungseffekte der Elektroden unstrukturierter.

Der Einfluss der Jahreszeit spiegelte sich sehr stark in den Tomogrammen wider. In der Winterperiode ist der äußere, gutleitfähige Ring nicht mehr zu sehen. Tendenziell

ist in dieser Zeit das Splintholz nicht vom Kernholz zu unterscheiden.

In der Phase ist ebenfalls eine Veränderung sichtbar. Diese wirkt sich jedoch nicht so stark aus. Der niedrigphasige, äußere Ring ist prinzipiell noch erhalten, jedoch nicht mehr so stark ausgedehnt. Dafür ist die innerste, niedrigphasige Zone wesentlich breiter als im Sommer. Diese Veränderungen sind auch im Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit erkennbar. Ursache für den Einfluss der Jahreszeit ist der veränderte Feuchtetransport innerhalb des Baumes. Zusätzlich wirkt sich die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur aus (vgl. Kapitel 2.4.3).

Weiterhin wurden in dieser Arbeit Eichen verschiedenen Alters untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass sich die Ausprägung der gutleitfähigen Zone im Bauminneren am stärksten verändert. Bei jungen Eichen (≤ 60 a) ist diese Zone bei niedrigen Frequenzen (0,1 Hz) nicht zu sehen. Bei Bäumen um 150 a ist sie vorhanden. Bei sehr alten (350 a) Eichen ist sie stark ausgeprägt. Da allerdings bei fast allen alten Eichen Fäule im Inneren auftritt, ist eine klare Abgrenzung des gutleitfähigen, innersten Kernholzbereichs vom geschädigten Kernholzbereich schwierig.

Pilzbefall an stehenden Bäumen äußert sich in den Tomogrammen in erster Linie durch die Zerstörung des konzentrischen, ringförmigen Aufbaus. Da der Pilz in der Regel durch äußere Schäden in den Baum gelangt, ist eine Durchbrechung der Ringstruktur für gewöhnlich zu einer Seite hin zu beobachten. Der Pilz verursacht, wie schon im Labor beobachtet, eine Verringerung des spezifischen Widerstands und der Phase. Allerdings ist es nicht möglich, eine klare Abgrenzung zwischen den infizierten und gesunden Bereichen zu ziehen, da gesundes, älteres Eichenkernholz ebenfalls durch niedrige spezifische Widerstände und niedrige Phasen gekennzeichnet ist.

Bei einem Vergleich von Feldmessungen und den anschließenden Labormessungen an Proben desselben Baumes wurde festgestellt, dass trotz unberücksichtigter Anisotropie die Ergebnisse der radialen Laborproben mit den Daten aus den Tomogrammen vergleichbar sind. Die Tendenzen sind identisch. Während der Tomographiemessungen breitet sich der Strom vorwiegend radial und tangential aus. Axiale Einflüsse sind vorhanden, jedoch in dem gezeigten Beispiel nicht ausschlaggebend. Allerdings könnten unter Berücksichtigung der Anisotropie genauere Ergebnisse erzielt werden.

Im Unterschied zu anderen Untersuchungsverfahren an Bäumen ist der spezifische Widerstand sensitiv gegenüber dem Wassergehalt (Holzfeuchte), die Phasenverschiebung gegenüber physiologischen Veränderungen der Holzzellen. Die Schalltomographie ist demgegenüber sensitiv gegenüber mechanischen Parametern wie Dichte und Festigkeit. In den meisten Fällen waren sich die Tomogramme dieser Verfahren ähnlich. Sie zeigten in etwa denselben Bereichen Schädigungen an. Beide Verfahren sind jedoch beeinflusst von der Anisotropie des Holzes, die jeweils nicht berücksichtigt wird. Bei kleinräumigen Rissbildungen ist eine Interpretation der Schalldaten schwierig. Im Gegenzug sind die Elektrikdaten sehr viel stärker von der Jahreszeit (Feuchtegehalt, Temperatur) abhängig. Verglichen mit dem invasiven Bohrwiderstandsverfahren haben jedoch zerstörungsarme Tomographieverfahren immer den Vorteil, bildgebend die komplette Ebene darzustellen, während beim BWS nur linienhafte Informationen gewonnen werden und zu Schäden im Baum führen können (*Jaskula und Blatt* (2001)).

Einschätzung und Ausblick

Generell eignet sich das SIP-Verfahren zur Detektion von Fäuleschäden an Bäumen. Allerdings ist die zusätzliche Information der Phasenverschiebung in den Feldmessungen noch nicht ausreichend nutzbar. Momentan ist die Messung sinnvoller Phasendaten bei adulten Bäumen bei Frequenzen unter 1 Hz möglich. Dort sind die im Labor nachgewiesenen Phasenkontraste am größten. Niedrige Frequenzen bedeuten aber immer ein Anstieg der Messzeit. Das Nutzen-Zeit-Verhältnis für die zusätzliche spektrale Erfassung der Phase ist derzeit noch gering. Mit der Lösung der Ankopplungsprobleme und der Berücksichtigung der Anisotropie und der Dreidimensionalität in der Inversionssoftware kann die Phasenmessung und -auswertung jedoch einen wichtigen Beitrag zu Baumuntersuchungen liefern.

Allerdings unterscheidet sich jede Baumart in ihrem Aufbau und damit auch in den Tomogrammen des komplexen Widerstands. Um das SIP-Verfahren generell anzuwenden ist es daher theoretisch nötig, eine Tomogrammbibliothek gesunder Bäume verschiedener Arten in verschiedenen Alterstufen zu unterschiedlichen Jahreszeiten anzulegen. Dies ist sehr aufwendig und langwierig. Daher ist das SIP-Verfahren als alleinige Methode zur zerstörungsfreien Fäuledetektion zur Zeit nicht zu empfehlen. In Kombination mit anderen Verfahren, vor allem dem Schallverfahren kann es jedoch bereits jetzt sinnvoll angewendet werden.

A Vorbereitende Untersuchungen

Widerstandstestnetzwerk

Zur Abschätzung der Genauigkeit der verwendeten Feldapparatur SIP 256C im Labor und zur Größenabschätzung des Messfehlers bei verschiedenen Frequenzen, wurde ein einfaches Widerstandstestnetzwerk mit 24 Potentialabgriffen gebaut. Zwischen den Abgriffen befinden sich in Reihe geschaltete $100\ \Omega$ Widerstände. Nach Herstellerangaben liegt der Fehler dieser Widerstände bei ca. 1 %.

An dieses Testnetzwerk wurde die Apparatur mit 24 Remote Units (RU) angeschlossen. Dabei wurde bei RU 1 und RU 2 Strom eingespeist und bei allen anderen Dipolen die Spannungsdifferenz erfasst. Es wurde bei 7 Frequenzen (10 Hz - 0,156 Hz) gemessen. In Abbildung A.1 sind die Ergebnisse für den Widerstand (links) und die Phase (rechts) für alle Frequenzen dargestellt. Die Abweichung der Widerstände liegt innerhalb der vom Hersteller angegebenen Werte ($\pm 1\ \Omega$). Für alle Frequenzen ergab sich der gleiche Widerstand. In der Phasenverteilung ist ein Einfluss der Frequenz jedoch erkennbar. Umso höher die Frequenz, desto größer wird der Phaseneffekt. Dies ist auf elektromagnetische Kopplungseffekte zurückzuführen.

Damit zeigt sich, dass mit der SIP 256C sehr genaue Widerstands- und Phasenmessungen theoretisch möglich sind.

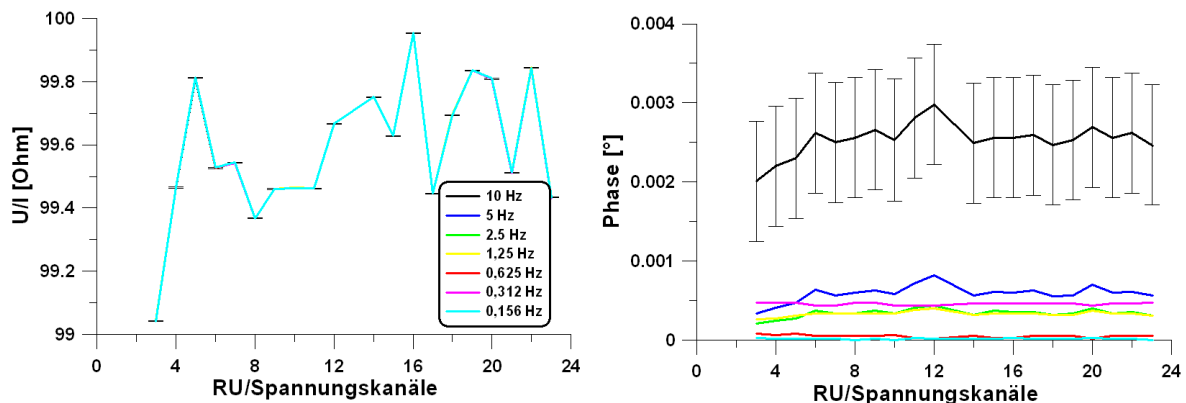


Abbildung A.1: Ergebnisse der Widerstands- und Phasenmessung am Testnetzwerk mit der SIP 256C für verschiedene Frequenzen. Die Widerstandsdaten sind frequenzunabhängig. In der Phase zeigt sich eine Zunahme der Phase mit steigender Frequenz. Der vom Gerät ausgegebene Messfehler für $f = 10\ \text{Hz}$ ist mitdargestellt. Für alle anderen Frequenzen ist er ähnlich groß.

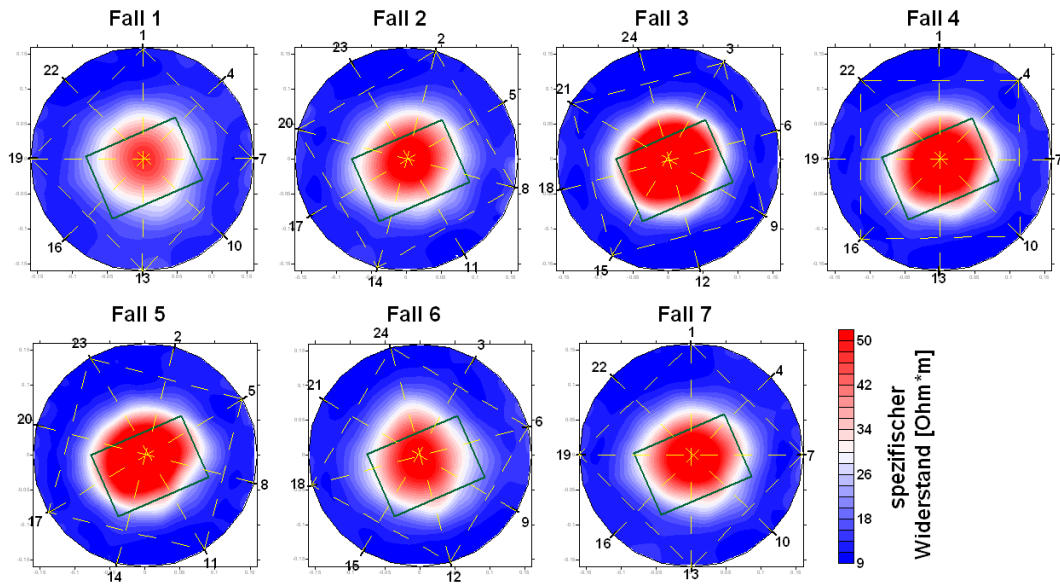


Abbildung A.2: Tomogramme des spezifischen Widerstands für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle bei einer Messung mit Holzbalken im wassergefüllten, zylindrischen Probekörper. Dabei markieren die grünen Vierecke die Position des Holzbalkens. Die gestrichelten, gelben Linien zeigen die Stromelektroden an.

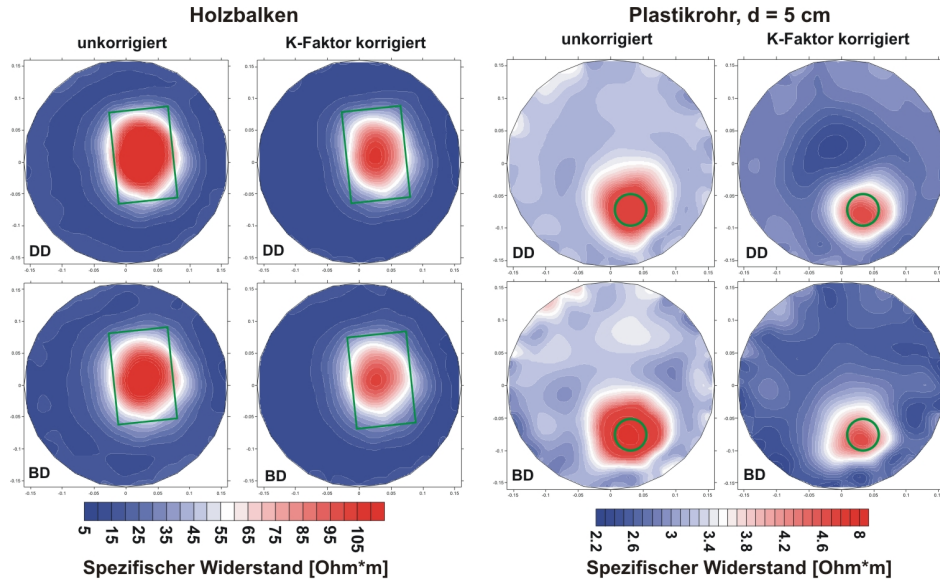


Abbildung A.3: Vergleich von K -Faktor korrigierten und unkorrigierten Widerstandstomogrammen für eine Messung mit Holzbalken (links) und Plastikrohr (rechts) für die Dipol-Dipol (DD) und Bipol-Dipol (BD) Auslage ($f = 1,25$ Hz). Im Fall des Holzbalkens enthielt der Probekörper Leitungswasser, im Fall des Plastikrohrs Salzwasser. Eine leichte Verbesserung der Auflösung durch die Korrektur ist erkennbar. Die grünen Umrisse geben die reale Lage des Holzbalkens bzw. des Rohres wieder.

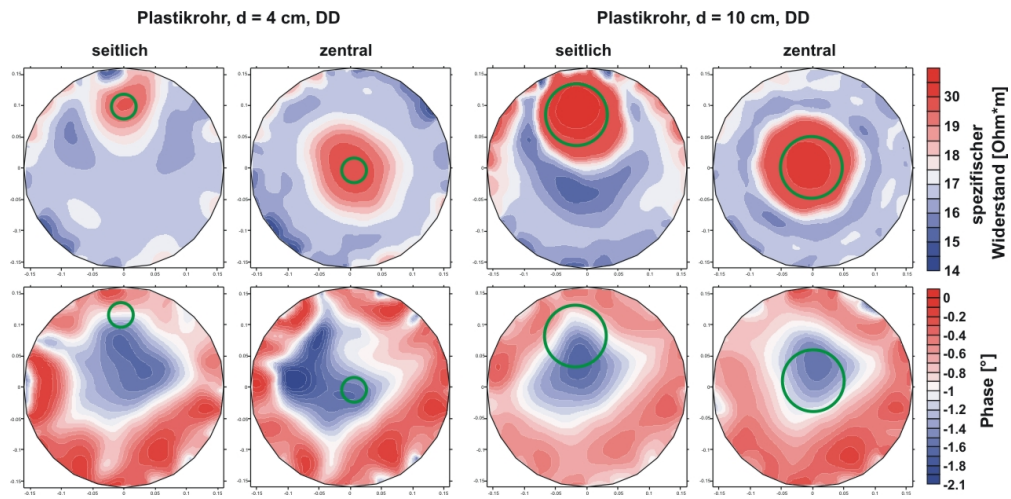


Abbildung A.4: Vergleich der Auflösung zweier unterschiedlicher Plastikrohre ($d_1 = 4$ cm (links), $d_2 = 10$ cm (rechts)). Die Rohre waren zentral und seitlich angeordnet. $f = 1,25$ Hz, Dipol-Dipol-Auslage.

B Labormessungen

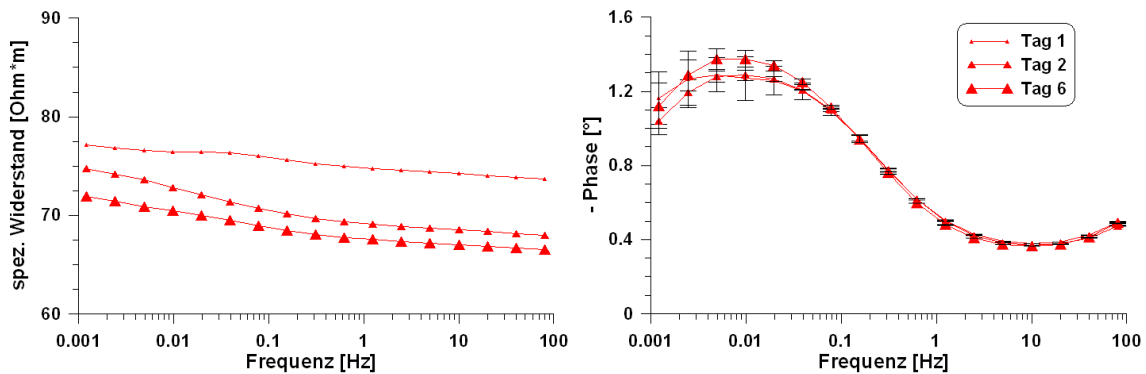


Abbildung B.1: Spezifischer Widerstand und Phase für eine Mehrfachmessung. Die Probe verändert sich in der Messzelle mit der Zeit. Die Standardabweichung für den spezifischen Widerstand beträgt dabei 4,5 %. Für die Phasenverschiebung ist sie mit 3 % geringer. Der Fehler der Phasenverschiebung nimmt mit geringer werdender Frequenz zu.

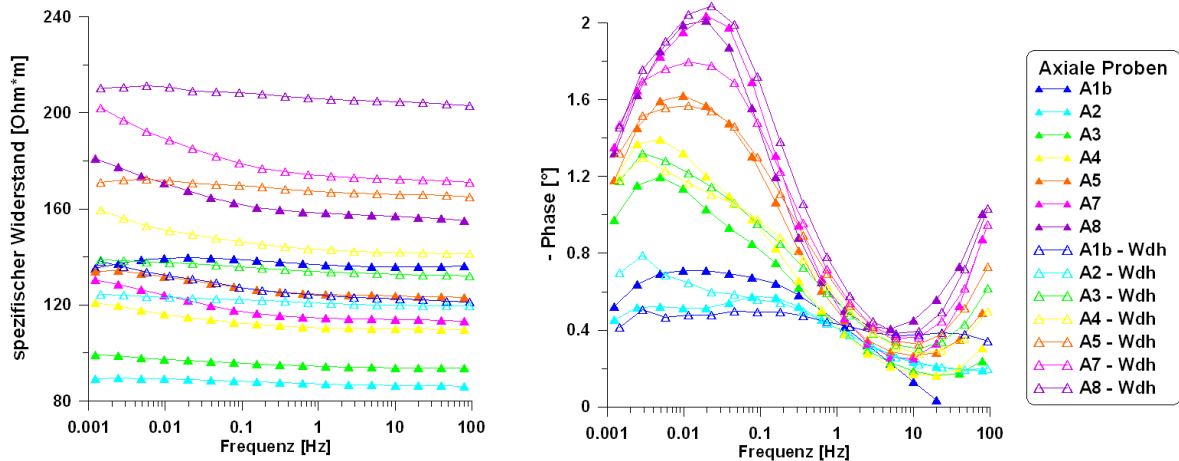


Abbildung B.2: Vergleich der Spektren von axialen Eichenkernholzproben zu unterschiedlichen Messzeitpunkten. Zwischen den Wiederholungsmessungen lagerten die Proben zwei Jahre vollgesättigt in destilliertem Wasser.

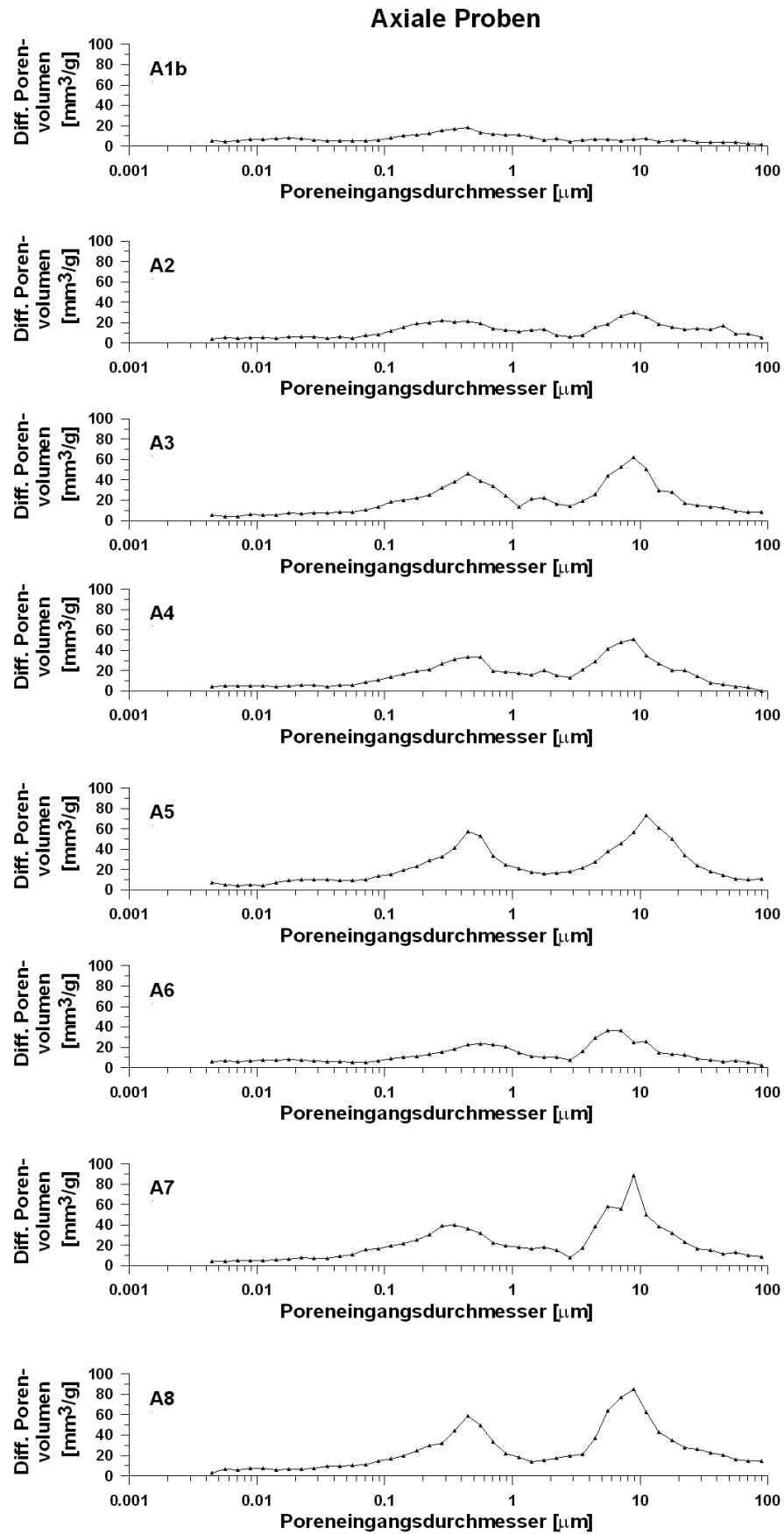


Abbildung B.3: Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen axialen Proben. Proben A3, A5 und A8 wurden mit 130 einem anderen Quecksilberporositätsmessgerät gemessen als die restlichen Proben.

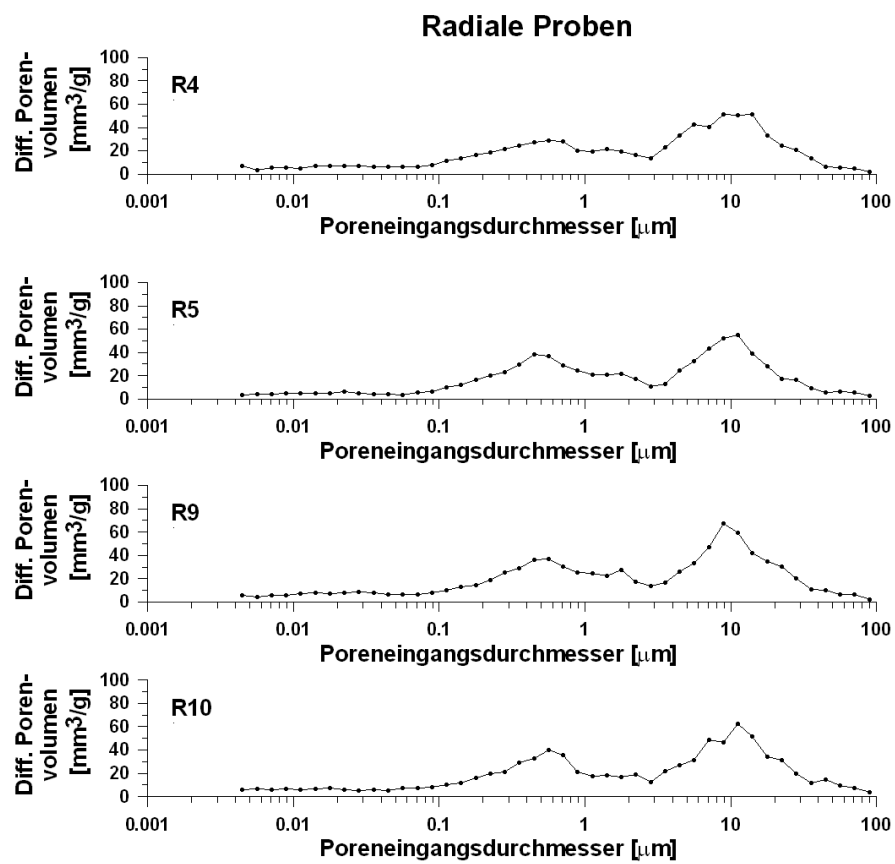


Abbildung B.4: Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen radialen Proben.

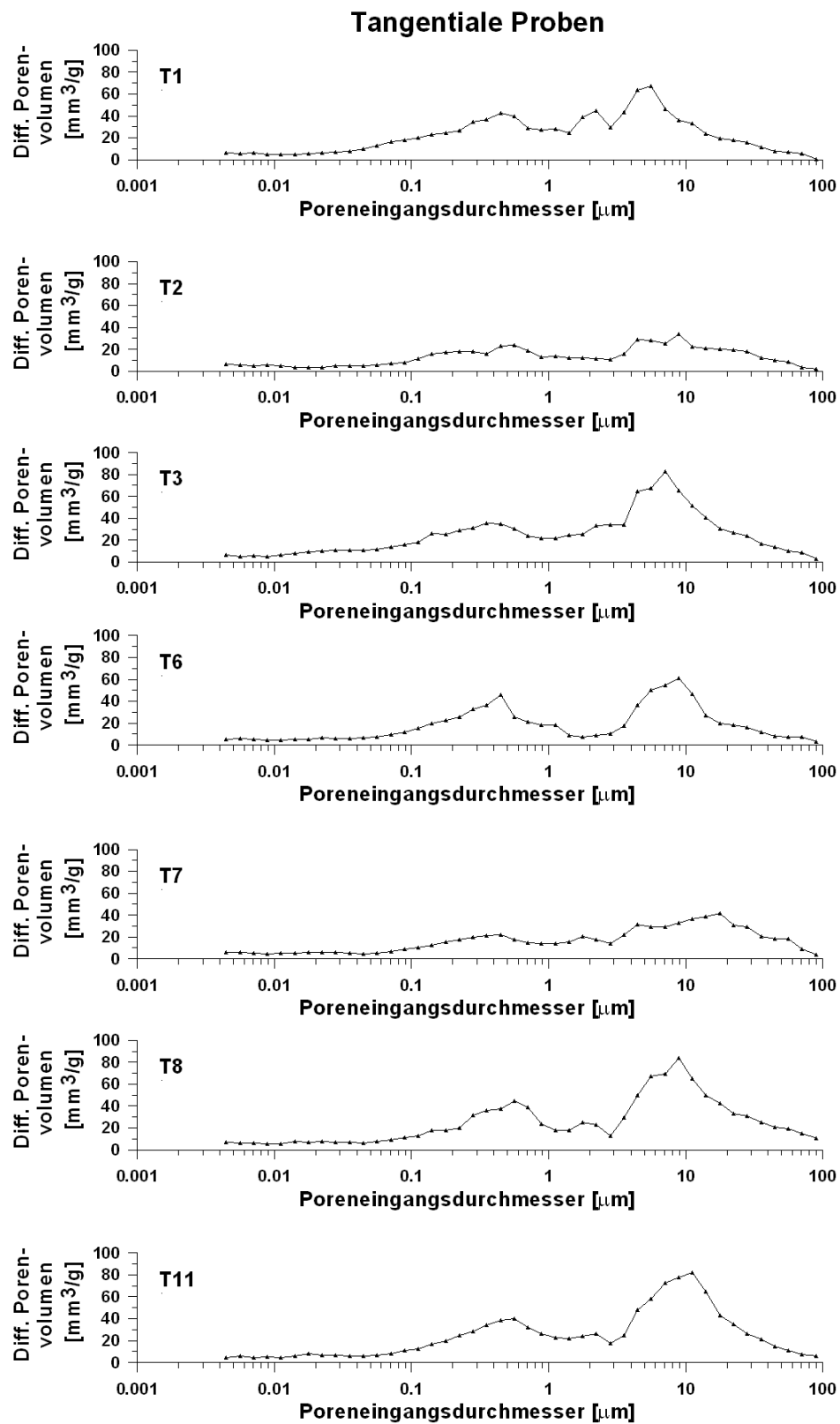


Abbildung B.5: Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen tangentialen Proben.

Axiale Proben

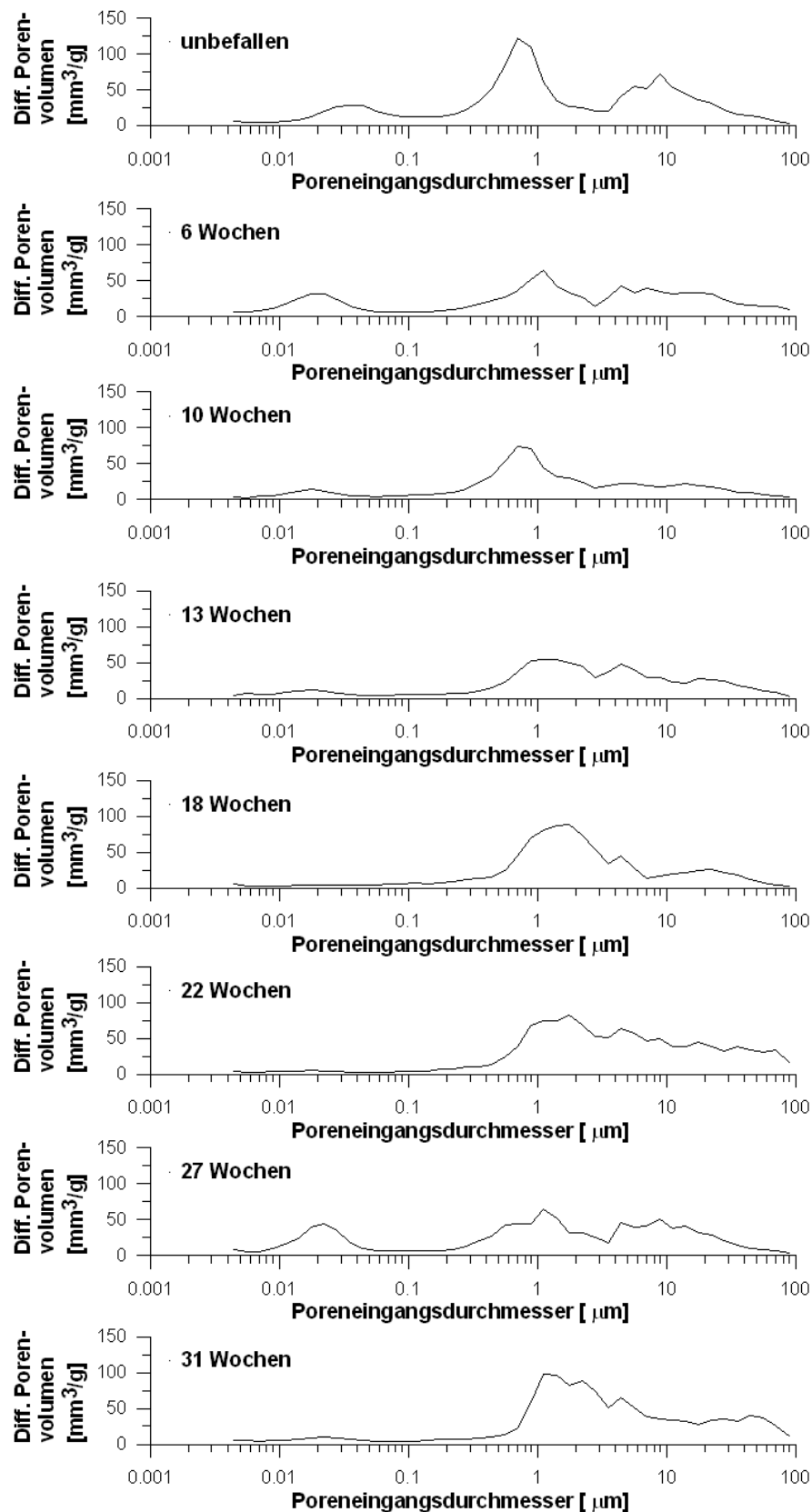


Abbildung B.6: Poreneingangsdurchmesser für alle in Kapitel 5.3.1 untersuchten axialen Eichenwirrlingsproben. Oben ist die unbefallenen Probe zu sehen; darauf folgend die Proben mit zunehmender Inkubationszeit.

Radiale Proben

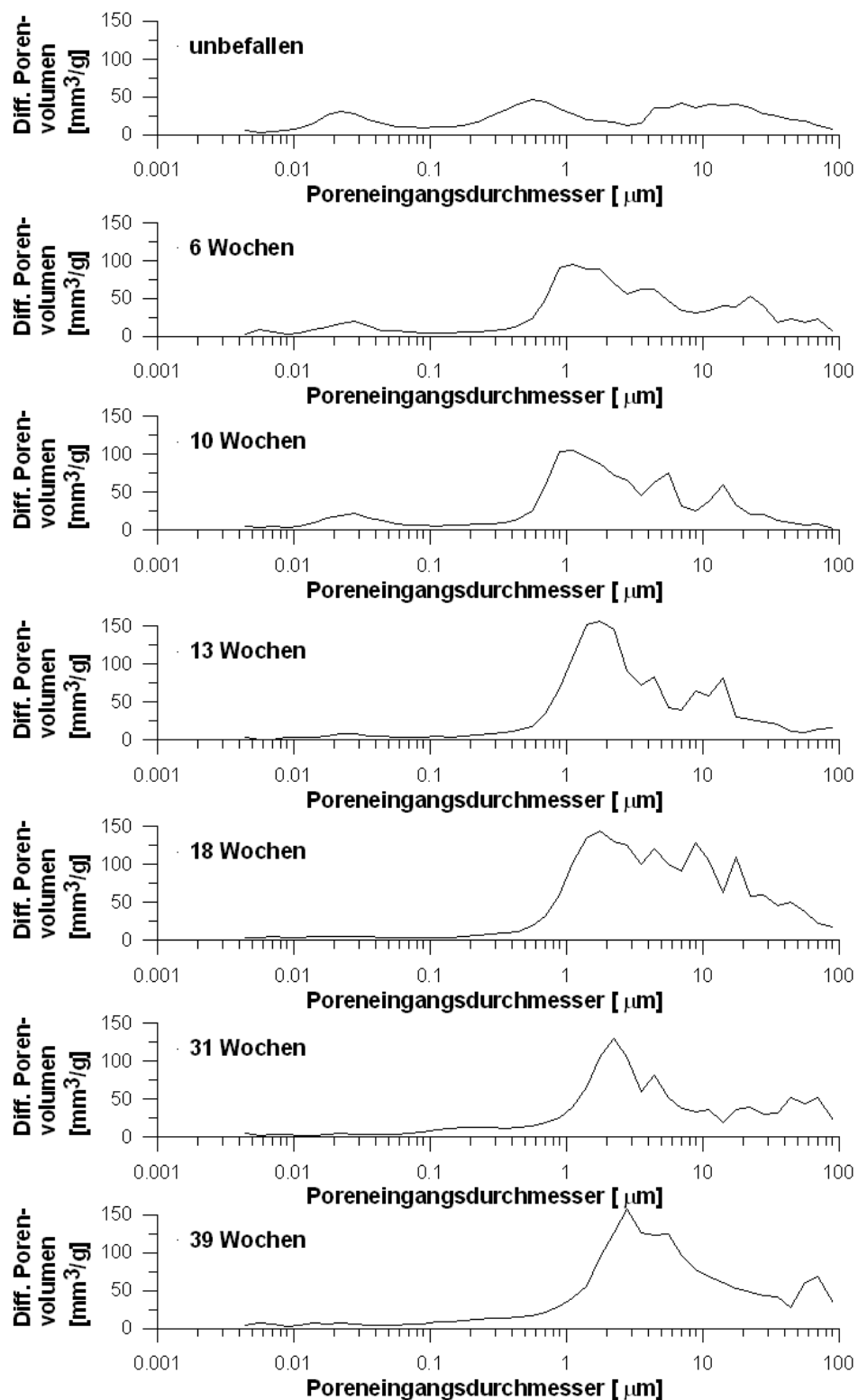


Abbildung B.7: Poreneingangsdurchmesser für alle in Kapitel 5.3.1 untersuchten radialen Eichenwirrlingsproben. Oben ist die unbefallene Probe zu sehen; darauf folgend die Proben mit zunehmender Inkubationszeit.

Porosimetriebestimmungen ausgewählter axialer Proben

Probe	A2 - Mehrfachmessung				A7	A10
Inkubationszeit (Wochen)	0		0		31	27
Ges. Porenvolumen (mm ³ /g)	1312,8015	1366,4752	1167,676		1218,0616	1043,6409
Spez. Oberfläche (m ² /g)	43,206	39,63	39,673		28,817	59,061
Mittl. Porendurchmesser (nm)	695,952393	707,548035	878,496338		1151,564941	1055,489136
Bulk-Dichte (g/cm ³)	0,52524	0,47473	0,51144		0,51144	0,60402
Korr. Bulk-Dichte (g/cm ³)	1,69177	1,35135	1,69888		1,35651	1,6342
Porosität (%)	68,9534	64,8702	66,4851		62,297	63,0385

Probe	A13	A18	A21	A24	A27
Inkubationszeit (Wochen)	22	18	13	10	6
Ges. Porenvolumen (mm ³ /g)	1203,5513	946,7125	864,4382	780,8007	977,0244
Spez. Oberfläche (m ² /g)	20,039	21,272	33,102	30,991	56,766
Mittl. Porendurchmesser (nm)	1524,427124	1339,112061	1317,918213	694,417114	1063,141113
Bulk-Dichte (g/cm ³)	0,55958	0,61059	0,6593	0,70488	0,62037
Korr. Bulk-Dichte (g/cm ³)	1,71376	1,44706	1,53298	1,56771	1,575
Porosität (%)	67,348	57,8051	56,9924	55,0373	60,6114

Abbildung B.8: Gesamtergebnisse der mit der Quecksilberporosimetrie untersuchten axialen Eichenwirrlingsproben aus Versuch 5.3.1.

Porosimetriebestimmungen ausgewählter radialer Proben

Probe	R2	R7	R9	R19
Inkubationszeit (Wochen)	0	39	31	18
Ges. Porenvolumen (mm ³ /g)	987,9802	1743,4945	1259,7969	1969,7694
Spez. Oberfläche (m ² /g)	43,513	23,928	17,721	21,424
Mittl. Porendurchmesser (nm)	690,509521	2496,62793	2005,549561	1615,257568
Bulk-Dichte (g/cm ³)	0,61176	0,44137	0,55326	0,39644
Korr. Bulk-Dichte (g/cm ³)	1,54632	1,9151	1,82594	1,80945
Porosität (%)	60,4376	76,953	69,6999	78,0903

Probe	R23	R26	R29
Inkubationszeit (Wochen)	13	10	6
Ges. Porenvolumen (mm ³ /g)	1482,8829	1266,0818	1276,4482
Spez. Oberfläche (m ² /g)	17,777	36,052	33,394
Mittl. Porendurchmesser (nm)	1592,52832	931,984375	1259,175293
Bulk-Dichte (g/cm ³)	0,50923	0,52101	0,53387
Korr. Bulk-Dichte (g/cm ³)	2,07953	1,53076	1,67596
Porosität (%)	75,5124	65,964	68,1455

Abbildung B.9: Gesamtergebnisse der mit der Quecksilberporosimetrie untersuchten radialen Eichenwirrlingsproben aus Versuch 5.3.1.

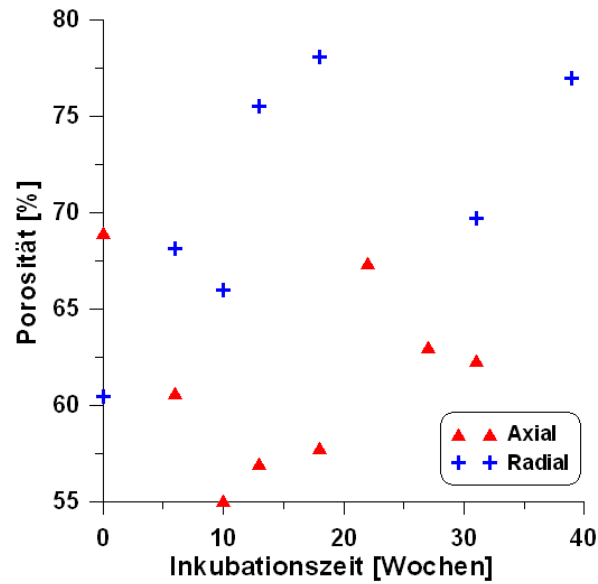


Abbildung B.10: Porosität aufgetragen gegen die Inkubationszeit. Tendenziell steigt die Porosität mit zunehmender Inkubationszeit an.

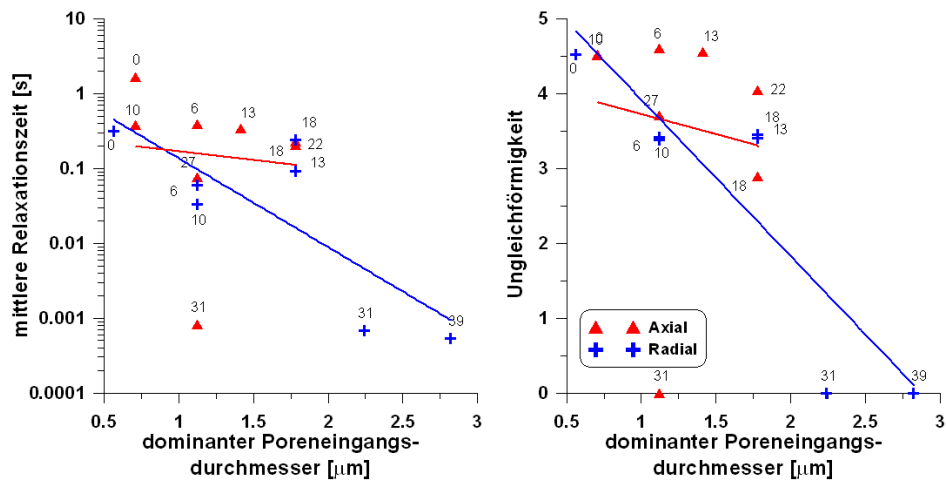


Abbildung B.11: Mittlere Relaxationszeit und Ungleichförmigkeit aufgetragen über den dominanten Poreneingangsdurchmesser. Die mittleren Relaxationszeiten und die Ungleichförmigkeit nehmen mit größer werdendem, dominantem Poreneingangsdurchmesser ab. Das ist für die radialen Proben deutlicher zu sehen als für die axialen Proben.

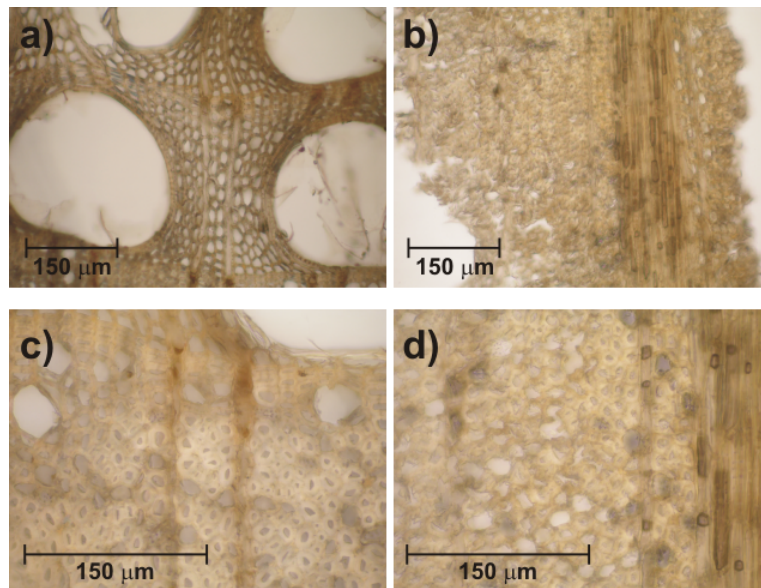


Abbildung B.12: Mikroskopische Aufnahmen der axialen Proben. Die Schnitte sind radial angesetzt. Bild a) unbefallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild b) unbefallene Probe in 40 - facher Auflösung. Bild c) befallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild d) befallene Probe in 40 - facher Auflösung.

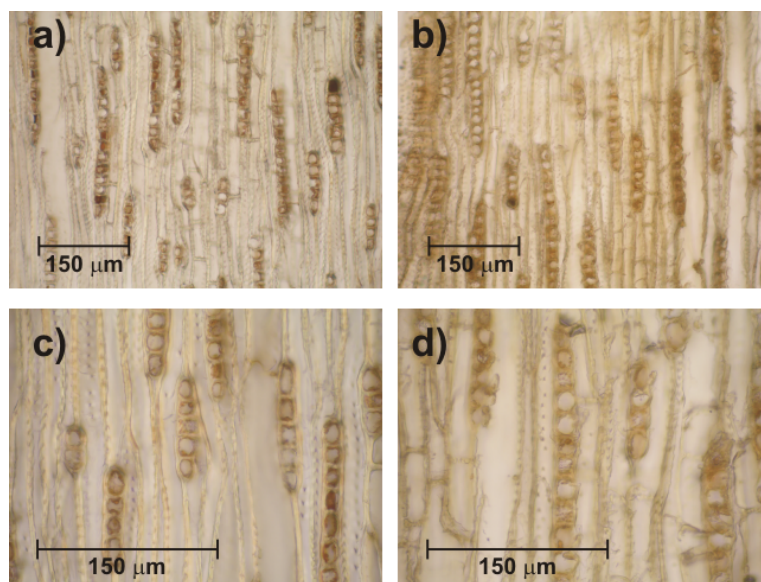


Abbildung B.13: Mikroskopische Aufnahmen der radialen Proben. Die Schnitte sind axial angesetzt. Bild a) unbefallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild b) unbefallene Probe in 40 - facher Auflösung. Bild c) befallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild d) befallene Probe in 40 - facher Auflösung.

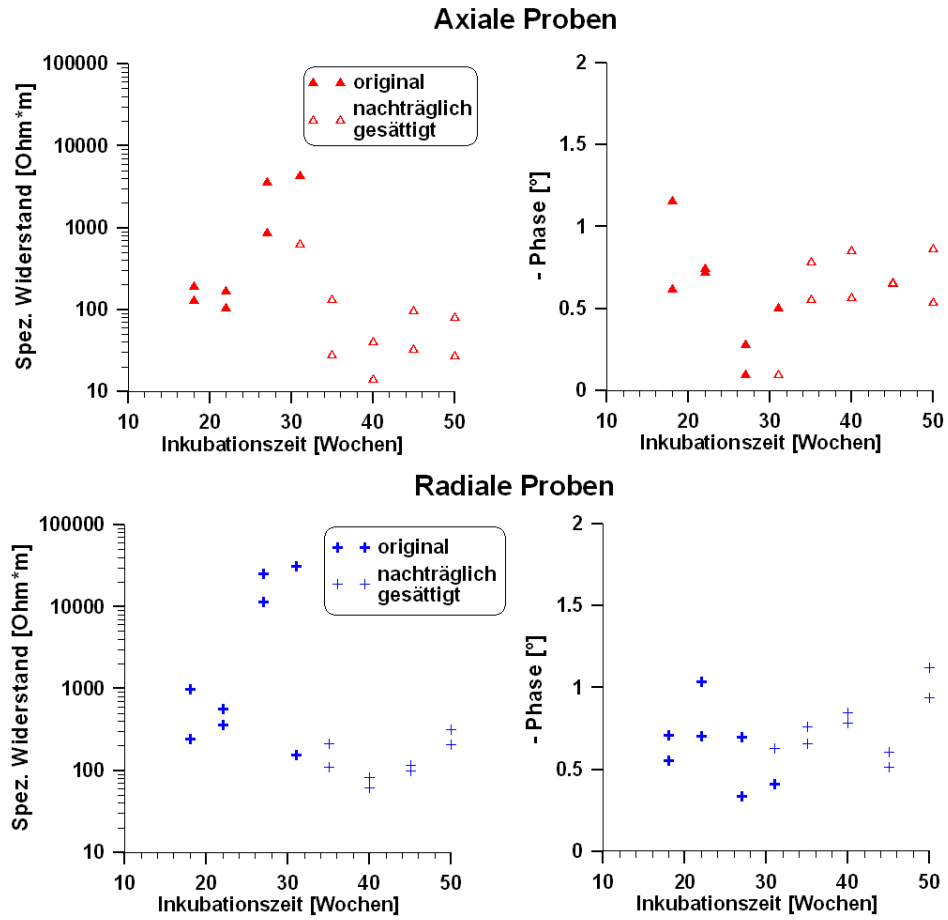


Abbildung B.14: Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Zeit für das jeweilige Phasenmaximum ($f_{max}^{axial} = 0,1 \text{ Hz}$, $f_{max}^{radial} = 0,01 \text{ Hz}$). Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung.

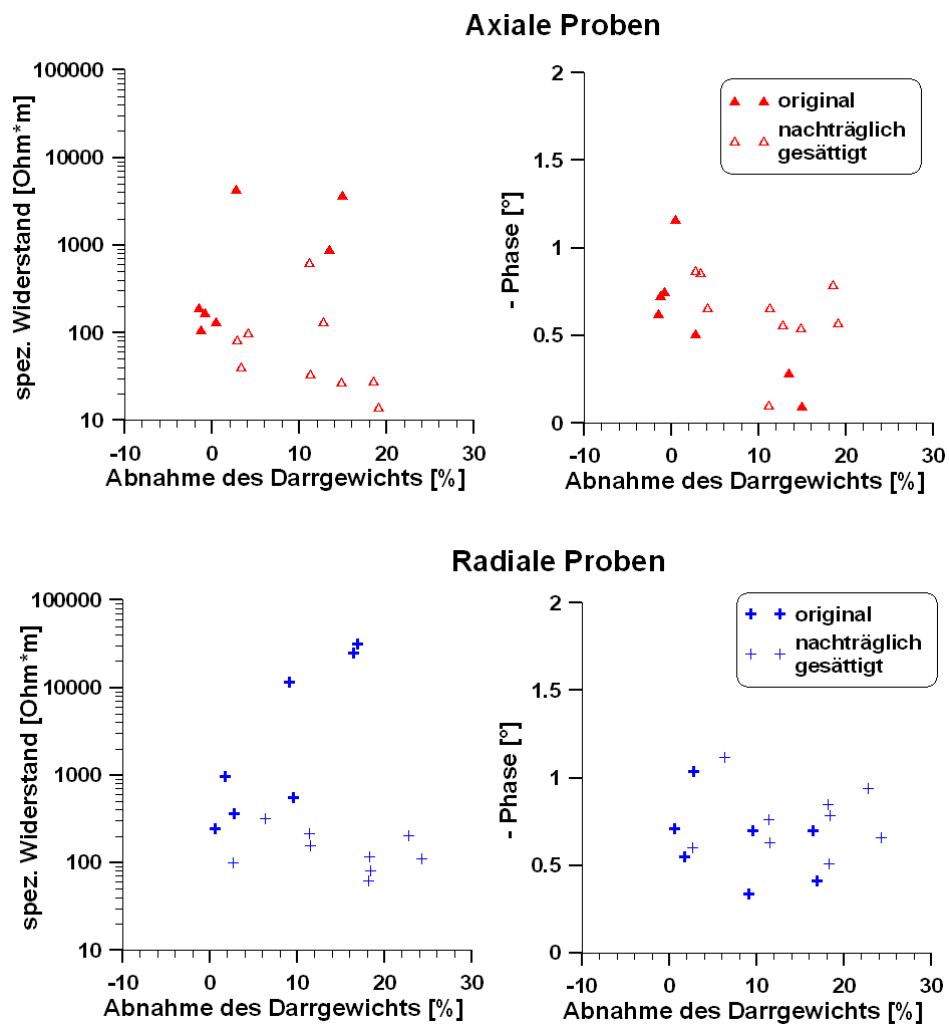


Abbildung B.15: Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Abnahme des Darrgewichts. Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung.

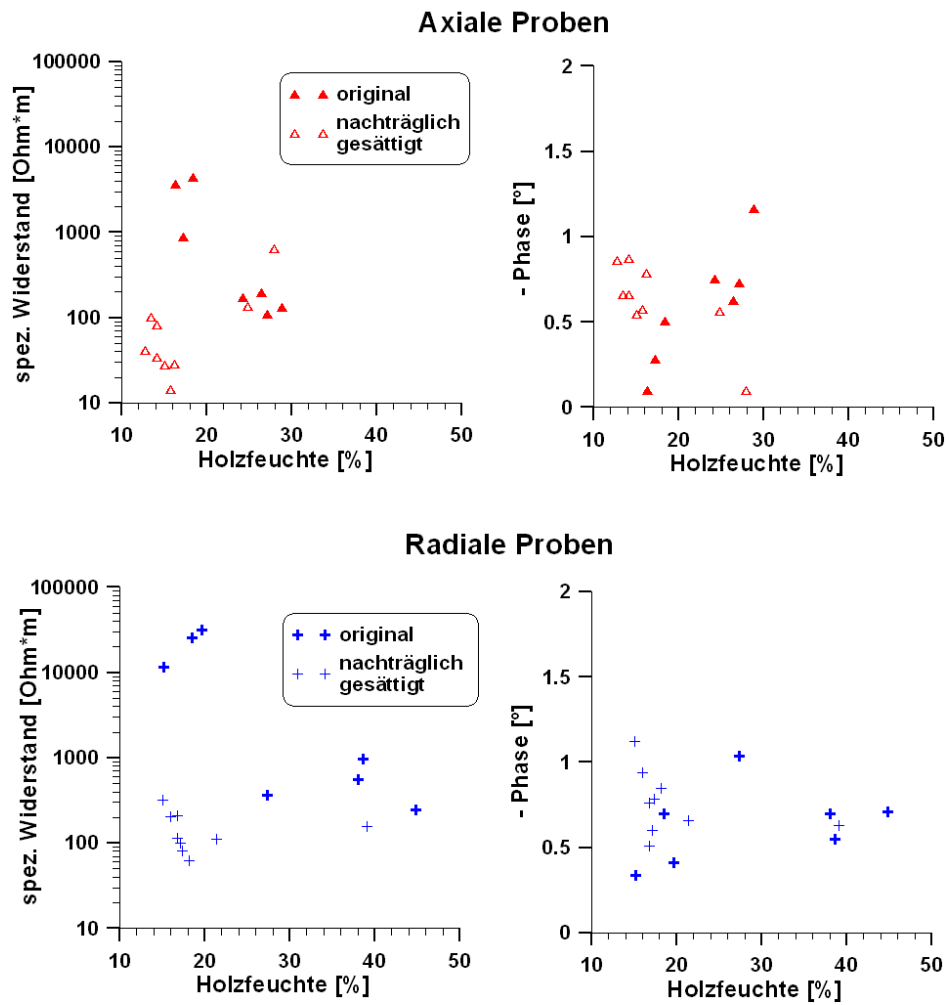


Abbildung B.16: Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Holzfeuchte. Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung.

C Feldmessungen

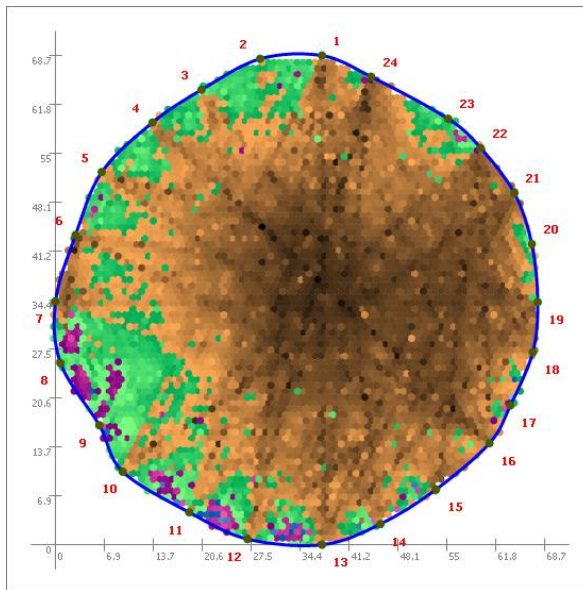


Abbildung C.1: Schalltomogramm der Referenzeiche. Braun steht für gesundes, festes Holz. Blau-Violett für stark zerstörtes Holz. Das Schalltomogramm zeigt einen im Inneren gesunden Baum.

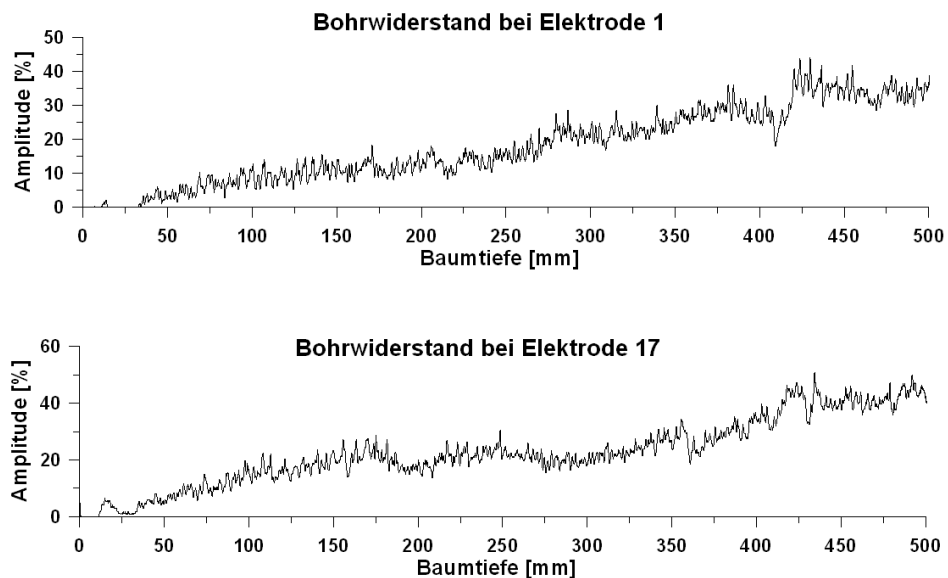


Abbildung C.2: Bohr widerstandsmessungen an der Referenzeiche. Der Bohrkanal befindet sich bei den SIP-Messelektroden 1 (oben) und 17. Der mechanische Bohr widerstand nimmt in Richtung Bauminneres zu. Der Baum ist an den gebohrten Stellen gesund.

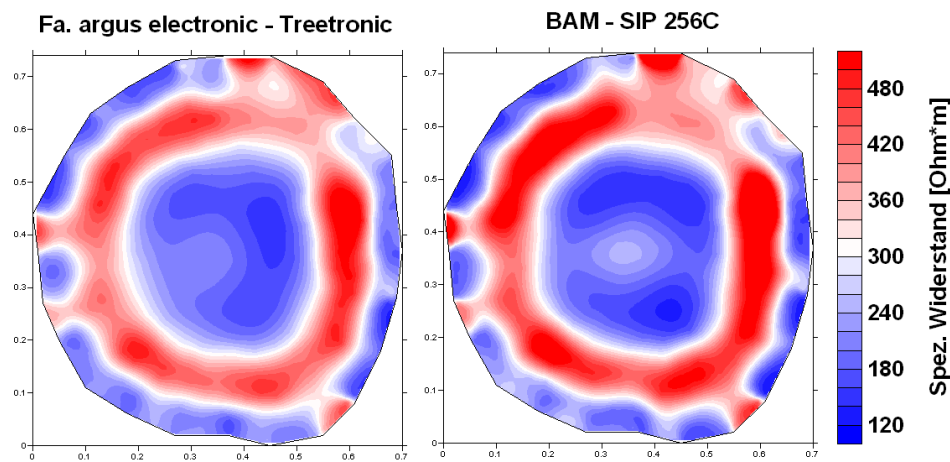


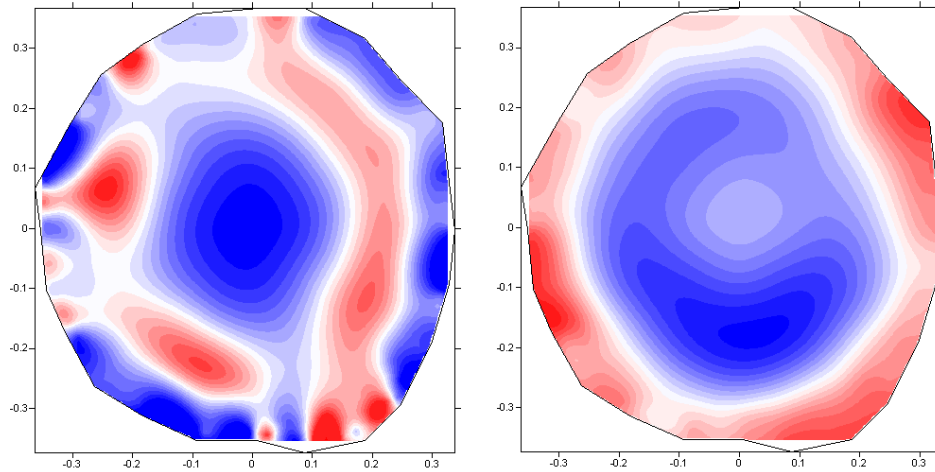
Abbildung C.3: Vergleich zwischen den spezifischen Widerstandsmessungen an der Referenzleiche (August 2007). Links: Messhardware Treetronic der Fa. argus electronic (Lothar Göcke), invertiert mit DC2dTree. Rechts: Messhardware SIP 256C, invertiert mit DC2dTree ($f = 0,156$ Hz). Zwischen beiden Tomogrammen bestehen nur sehr geringe Unterschiede.

Kurz vor Abgabe dieser Arbeit wurde die Inversionssoftware CRTomo (*Kemna* (2000), Uni Bonn) so modifiziert, dass nun auch der komplexe elektrische Widerstand unregelmässiger, zylindrischer Körper invertiert werden konnte. Dadurch war zum ersten Mal ein direkter Vergleich zwischen zwei verschiedenen Versionen von Inversionssoftware möglich. Wie in Abbildung C.4 zu sehen, bleiben die generellen konzentrischen Strukturen innerhalb des Baumes erhalten. Sowohl die spezifischen Widerstände als auch die Phasen liegen in denselben Wertebereichen. Leichte Unterschiede gibt es bei der niedrigphasigen Anomalie im Zentrum des Baumes (Phasentomogramme - Abb. C.4 rechts). In dem Inversionsergebnis von CRTomo wird diese Zone nicht so ausgeprägt wiedergegeben wie bei DC2dTree.

Mit diesen Ergebnissen zeigt sich, dass die Nutzung der bisherigen Software DC2dTree gerechtfertigt ist. Die Tomogramme korrelieren damit nicht nur mit den Laborergebnissen, sondern ebenfalls mit anderen Inversionsalgorithmen.

Referenzeiche - Juni 2007, $f = 0,156\text{Hz}$.

Inversion: CRTomo



Inversion: DC2dTree

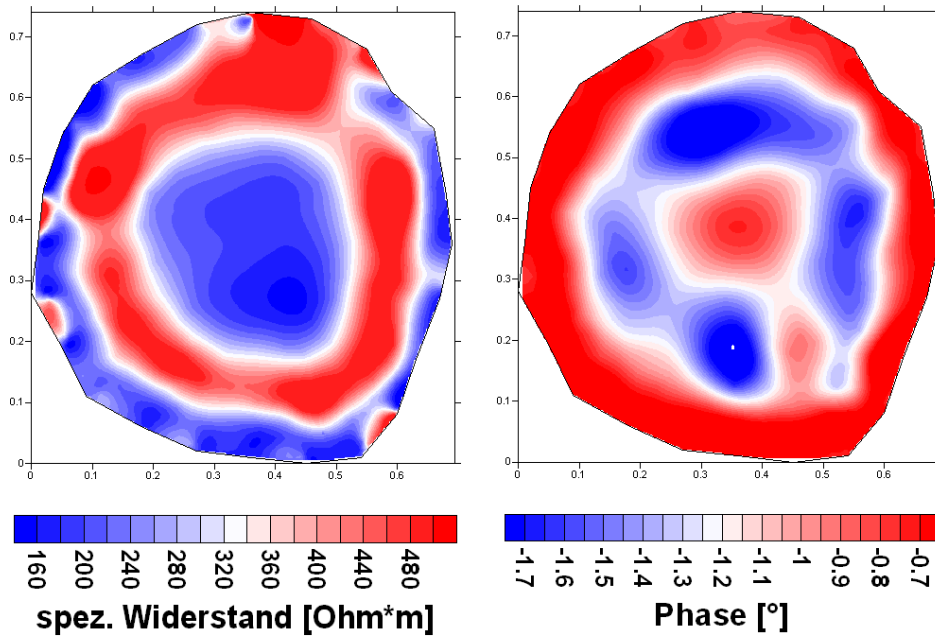


Abbildung C.4: Vergleich der Inversionsergebnisse für den spezifischen Widerstand und die Phase für den Datensatz der Referenzeiche im Juni 2007. Oben: Inversionssoftware der Uni Bonn. Unten: DC2dTree - Inversion. Grundsätzlich sind ähnliche Strukturen zu sehen.

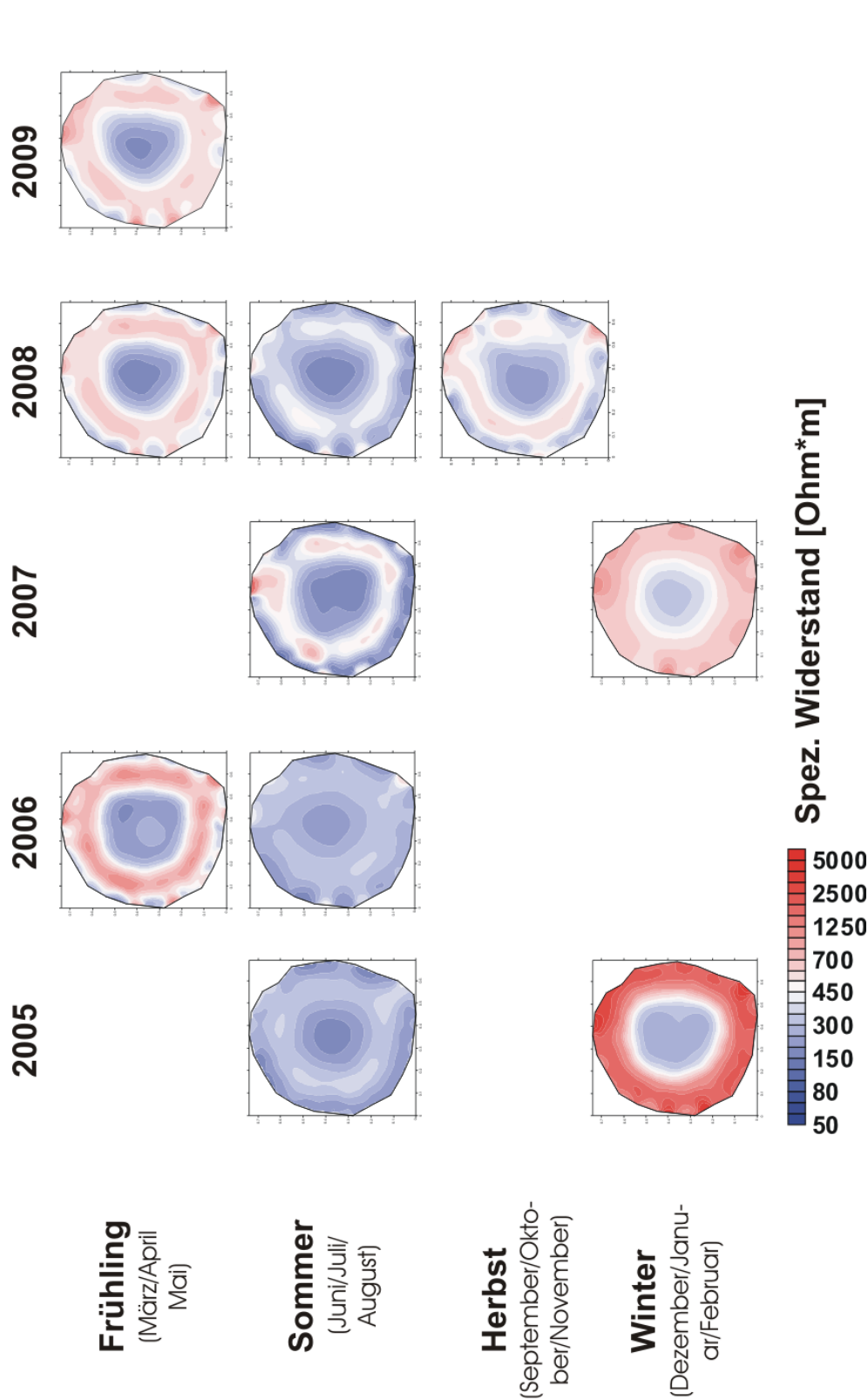


Abbildung C.5: Tomogramme des spezifischen Widerstands für sämtliche Jahreszeitenmessungen der Referenzreihe ($f = 0,156 \text{ Hz}$). Die Messungen fanden zwischen August 2005 und April 2009 statt.

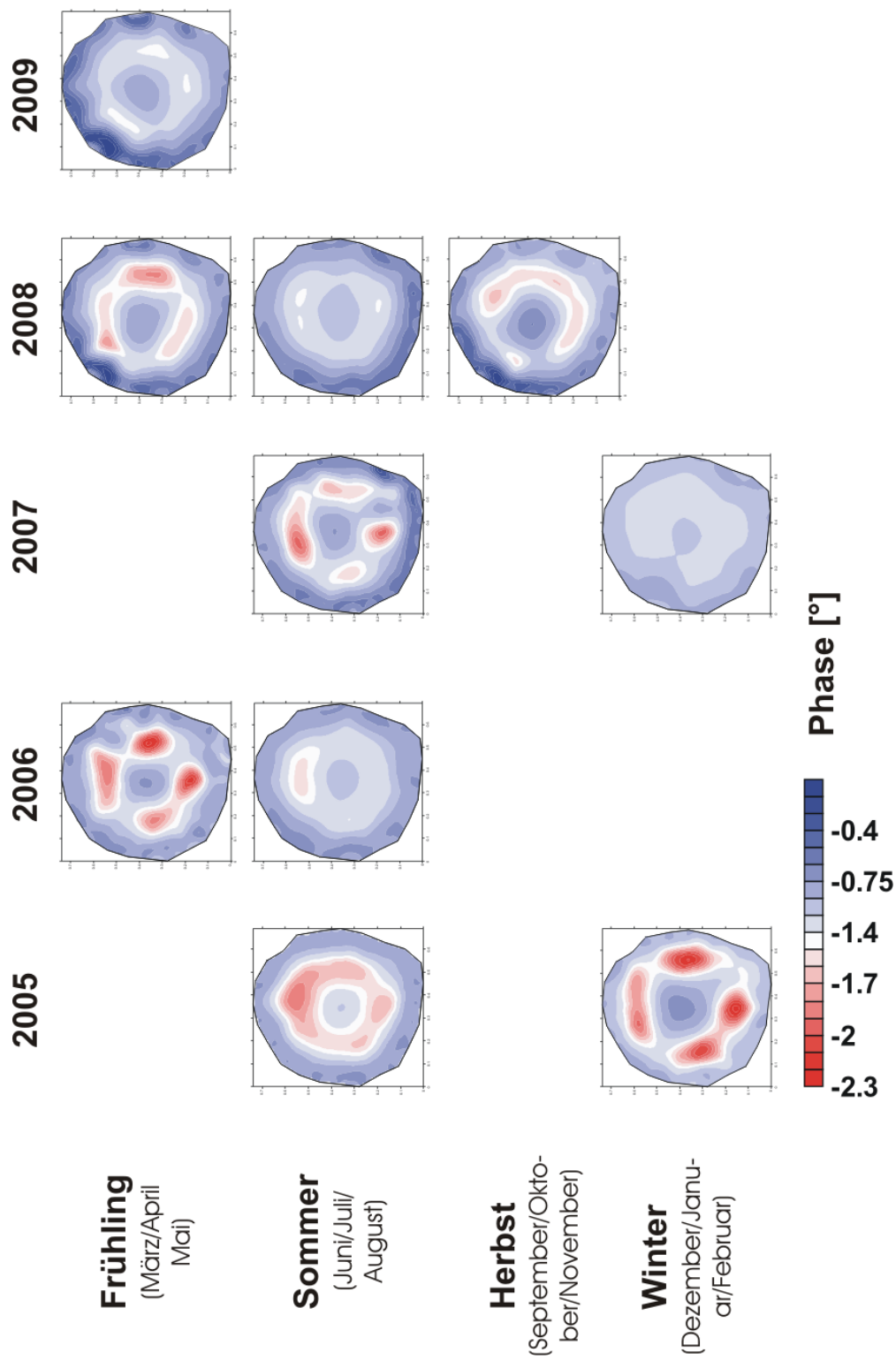


Abbildung C.6: Tomogramme der Phasenverschiebung für sämtliche Jahreszeitenmessungen der Referenzreihe ($f = 0,156 \text{ Hz}$). Die Messungen fanden zwischen August 2005 und April 2009 statt.

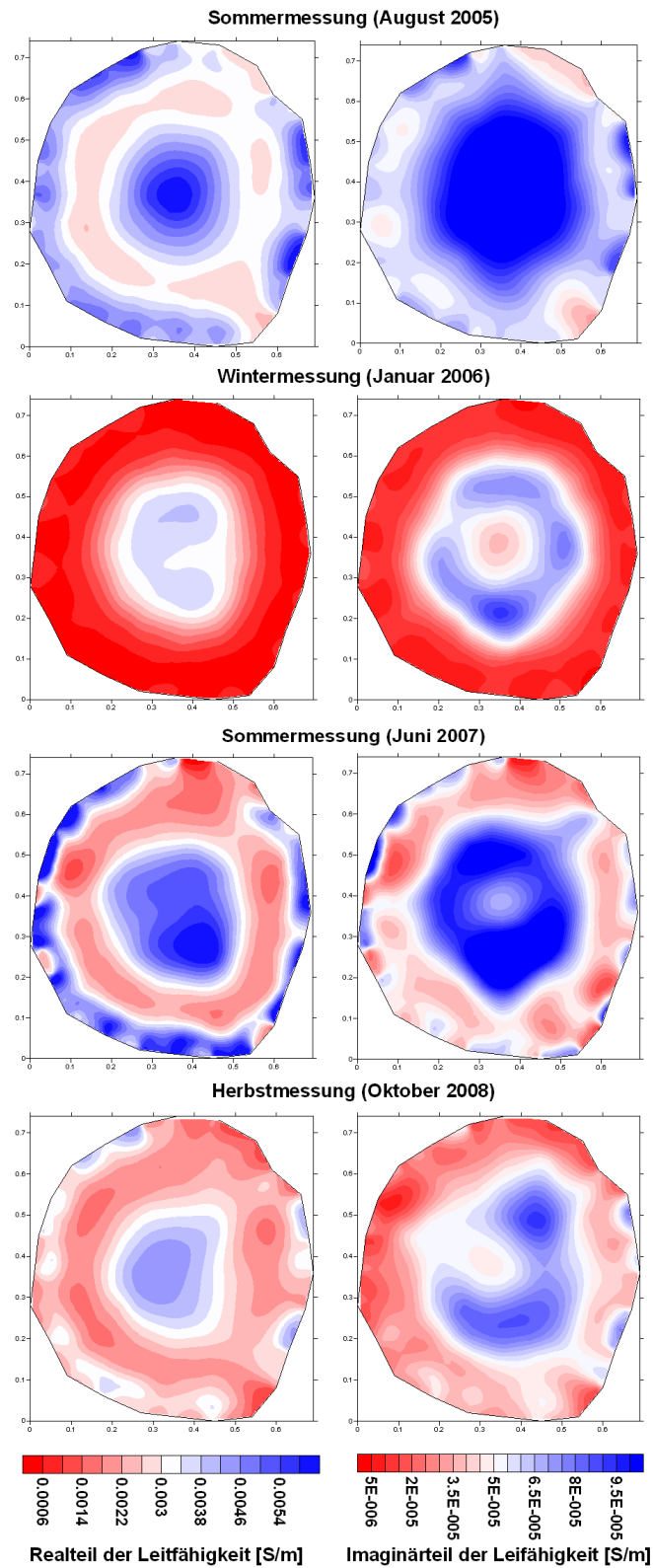


Abbildung C.7: Tomogramme des Real- (links) und Imaginärteil (rechts) der Leitfähigkeit zu unterschiedlichen Jahreszeiten für $f = 0,156$ Hz. Der Einfluss der Jahreszeit wirkt sich auch auf die Leitfähigkeitsanteile aus.

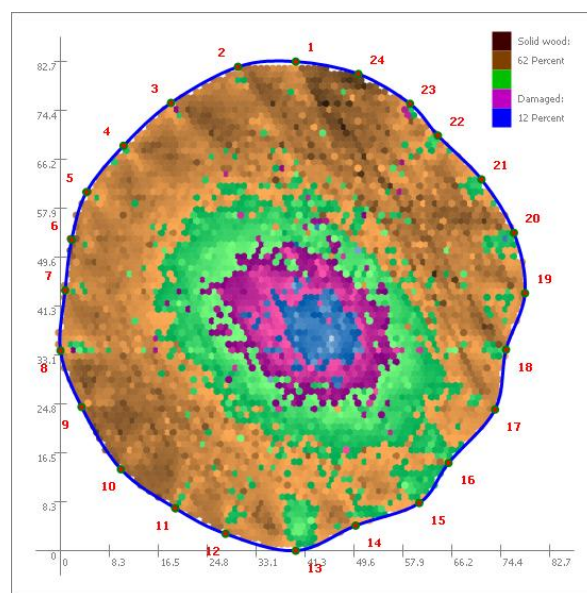


Abbildung C.8: Schalltomogramm der 350-jährigen Eiche. Braun steht für gesundes, festes Holz. Blau-Violett für stark zerstörtes Holz. Im Inneren dieser Eiche ist eine Zone mit geringerer Holzfestigkeit zu sehen.

Symbole und Abkürzungen

Liste häufig verwendeter Symbole

Symbol	Erklärung	Einheit
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand,	Ωm
φ	Phasenverschiebung	$^{\circ}$ oder mrad
σ	elektrische Leitfähigkeit	S/m
σ'	Realteil der Leitfähigkeit	S/m
σ''	Imaginärteil der Leitfähigkeit	S/m
f	Frequenz	Hz
n	Sättigungsexponent des Realteils	1
ν	Sättigungsexponent des Imaginärteils	1
u	Holzfeuchte	%
A	Anisotropiekoeffizient	1
S	Sättigung	1
K	Konfigurations- bzw. Geometriefaktor	m

Liste häufig verwendeter Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
RU	Remote Unit - Messkanal
BU	Base Unit - Messeinheit
DD	Dipol-Dipol-Auslage
BD	Bipol-Dipol-Auslage
WA	Wenner-alpha-Auslage
SL	Schlumberger-Auslage
C_1	Stromkanal 1
C_2	Stromkanal 2
P_1	Spannungskanal 1
P_2	Spannungskanal 2
BWS	Bohrwiderstand

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines Baumes, dargestellt im Querschnitt. Die Rinde schützt den Baum vor äußeren Einflüssen. Neues Gewebe wird im Kambium gebildet und produziert nach innen den Holzkörper. Dieser unterscheidet sich in junges, lebendes Splintholz und abgestorbenes Kernholz. Im Zentrum befindet sich der Markstrang - die erste Triebspitze eines jeden Baumes. (Quelle: <i>Schweingruber</i> (1990)).	4
2.2	Darstellung verschiedener Tüpfelpaare. a) Einfaches Tüpfelpaar. Es verbindet zwei lebende Parenchymzellen miteinander. b) Hoftüpfelpaar. Sie werden zwischen toten wasserleitenden und festigenden Zellen ausgebildet. c) Ein einseitig behöftes Tüpfelpaar tritt zwischen toten Tracheiden und lebenden Parenchymzellen auf (Quelle: <i>Grosser</i> (1977)).	6
2.3	A) zellulärer Aufbau einer Eiche (<i>Quercus robur</i>). Deutlich sind die großen, im Frühjahr gebildeten Gefäße zu erkennen, die sich in axialer Richtung ausbreiten. Die Holzstrahlen verlaufen radial (im Bild waagrecht). Ein Jahrring besteht aus den im Sommer großlumigen und im Winter englumigen Zellen. B) Vereinfachter Aufbau der Holzzellwände mit der Mittellamelle, der Primärwand und der dreischichtigen Sekundärwand zu erkennen. (Quelle: <i>Dinwoodie</i> (2000), z. T. modifiziert) . .	7
2.4	Rasterelektronenaufnahme von Eichenholz. A: zelluläre Querschnittaufnahme mit Frühholzgefäßen. B: Tangentialschnitt von Tüpfeln mit angrenzenden, lebenden Parenchymzellen. C: Mit zunehmenden Alter der Gefäße oder bei Lufteinbruch bilden sich in den Gefäßen Thyllen (blasenartige Ausstülpungen) aus. Diese wachsen aus den Tüpfeln ins Innere der Gefäße bis sie diese komplett (D - Tangentialschnitt, E - Querschnitt) verschließen. Das Holz ist nun verthyllt/verkernt und ein Lufteinbruch nicht mehr möglich. (Quelle: <i>Schwarze et al.</i> (1999))	8
2.5	Drei Feuchtigkeitsgrenzzustände von Holzzellen. A: Lumen und Holzzellen sind wassergefüllt. Es herrscht Wassersättigung. Die Feuchtigkeit beträgt bis zu 200 %. B: Die Fasern sind wassergesättigt. In den Lumen ist kein Wasser. Es herrscht Fasersättigung. Der Feuchtegehalt beträgt 28 - 32 %. C: In den Lumen und Zellwänden ist kein Wasser. Das Holz ist darrtrocken. Die Feuchtigkeit beträgt 0 %. (verändert nach <i>Kempe</i> (1999)).	9
3.1	Die elektrische Doppelschicht (EDL). Links: Die Ionenverteilung an der Grenze von Teilchen mit negativer Oberflächenladung zum Elektrolyt. Rechts: Der Konzentrationsverlauf von Anionen und Kationen, nach <i>Radic</i> (2008b).	24

3.2	Zeitverlauf des eingespeisten Wechselstromsignals und des gemessenen Spannungssignals. Der spezifische Widerstand berechnet sich aus dem Verhältniss der beiden Signale multipliziert mit dem jeweils geltenden Geometriefaktor. Die Phasenverschiebung ergibt sich aus der zeitlichen Differenz beider Signale.	25
3.3	Links: Abbildung des Laboraufbaus mit der Apparatur SIP 256C. Rechts: BAM Messzelle. Dabei wird der Strom an den Stirnseiten der Messzelle eingespeist, während die Spannung direkt über der Probe abgegriffen wird.	27
3.4	Schematische Darstellung des Messaufbaus einer Labormessung. Eine Reference Remote Unit (RRU) misst über einen definierten Shunt den Strom. Die zweite RRU misst die Spannung über der Probe. Nach <i>Radic</i> (2004a).	27
3.5	Links: Spezifischer Widerstand einer mit Leitungswasser, destilliertem Wasser und mit 1 %-iger Agar-Agar-Lösung gefüllten Messzelle. Rechts: Zugehörige Phasendarstellung. Alle drei Ankopplungsmittel weisen erst bei höheren Frequenzen Eigeneffekte auf.	28
3.6	Links: Skizze des Messaufbaus im Feld. BU - Base Unit, RU1 - RU24 - Remote Units, C - Stromelektroden, P - Spannungselektroden. Rechts: Einsatz des Feldmesssystems an einer Eiche. Die Ankopplung erfolgt über Nägel die durch Klemmen mit den in Reihe geschlossenen Remote Units (RUs) verbunden sind.	29
4.1	Schematische Zeichnung des zylindrischen Probekörpers. In dem nach unten abgedichteten und nach oben offenen Rohr wurden drei Elektrodenebenen angebracht. Die äußeren beiden bestanden aus herkömmlichen Stahlelektroden, die mittlere Ebene aus Goldelektroden. Das Rohr war für die Versuche mit Wasser gefüllt.	34
4.2	Übergangswiderstände an einer Eiche (<i>Quercus robur</i>) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Nägel. Die niedrigsten Übergangswiderstände wurden bei einer Eindringtiefe von 3 cm erreicht.	35
4.3	Vergleich zwischen Stahl- und Goldelektroden. Während beim scheinbaren Widerstand die Werte sowohl für die Stahl- als auch für die Goldelektroden sehr gut übereinstimmen (rechts), ist in der Phasenverteilung (links) keine signifikante Verbesserung der Goldelektroden gegenüber den Stahlelektroden erkennbar.	36
4.4	Schematische Abbildung einer Dipol-Dipol-Messung an einem zylindrischen Körper. Dabei treten sowohl normale (Spannungsdipole hinter dem Stromdipol) als auch reziproke (Spannungsdipole vor dem Stromdipol) Messwerte auf.	37
4.5	Vergleich von normalen und reziproken Daten für den ersten Stromdipol $C_1 = 1$, $C_2 = 2$. Die Unterschiede in den scheinbaren Widerständen sind gering, während in der Phasenverteilung die Daten weniger gut übereinstimmen.	38

4.6	Scheinbare Widerstands- und Phasenverteilung für den 13. Stromdipol zu unterschiedlichen Messzeiten. Während der scheinbare Widerstand innerhalb eines Messzyklus konstant bleibt, ändert sich der Phaseneffekt geringfügig.	39
4.7	Bipol-Dipol-Konfiguration mit acht Anordnungen. Dabei stehen sich die Strombipole bei vier Anordnungen 180° gegenüber (Anordnung 1-4) und bei vier weiteren 90° (Anordnung 5-8) zueinander. Alle anderen Elektroden zeichnen als Spannungsdipole auf.	40
4.8	Schematische Darstellung der Wenner- (WA), Schlumberger- (SL) und Dipol-Dipol-Konfiguration (DD). Bei den ersten beiden Konfigurationen befinden sich die Spannungselektroden P_1 , P_2 zwischen den Stromelektroden C_1 , C_2 . Bei der Dipol-Dipol-Konfiguration sind beide Dipole nebeneinander angeordnet. Die Gesamtauslagenlänge L setzt sich entweder zusammen aus dem Abstand der Stromdipole (WA, SL) oder aus dem Vielfachen des Dipolabstandes a	43
4.9	a-d: Inversionsergebnisse der spezifischen Widerstände für den mit Wasser gefüllten Probekörper für verschiedene Konfigurationen ($f = 1,25$ Hz). Die höherohmige, zentrale Anomalie im Zentrum des Probekörpers ist auf die Vernachlässigung des 3D-Effekts zurückzuführen (vgl. dazu Kap. 4.4). d-h: Histogramme der Phasenmesswerte für dieselbe Messung. Die erwarteten Phasenwerte um 0° sind bei der SL-Konfiguration am besten wiedergegeben.	44
4.10	Abweichungen der experimentell bestimmten K -Faktoren von den im Inversionsprogramm berechneten K -Faktoren. Links für die Bipol-Dipol-Konfiguration mit den Stromeinspeiseelektroden 4 - 16 und rechts für die Dipol-Dipol-Konfiguration mit den Stromeinspeiseelektroden 1 - 2. . .	45
4.11	Tomogramme des spezifischen Widerstands für eine Messung am wasser-gefüllten Probekörper bei $f = 1,25$ Hz. In der linken Spalte sind die unkorrigierten (2D) Widerstandstomogramme beider Konfigurationen zu sehen. Rechts die K -Faktor korrigierten (3D) Widerstandstomogramme. Deutlich sind die Unterschiede im spezifischen Widerstand zwischen 2D-Fall und 3D-Fall zu sehen.	46
4.12	Unkorrigierte Widerstandstomogramme für eine Bipol-Dipol-Wassermessung am Probekörper mit unterschiedlichen Wasserstandshöhen. Im linken oberen Tomogramm befand sich die Messebene nur 1 cm unter der Wasseroberfläche, während in dem rechten unteren Tomogramm der Probekörper bis oben gefüllt war (25 cm Wasserstandshöhe über Messebene), $f = 1,25$ Hz.	47
4.13	Darstellung der Konfigurationsfaktoren vom Inversionsprogramm DC-2dTree und der experimentell bestimmten K -Faktoren für verschiedene Wasserstandshöhen. Mit abnehmender Wasserstandshöhe werden die Differenzen der berechneten K -Faktoren gegenüber den vom Programm verwendeten K -Faktoren immer größer.	48

4.14	Tomogramme des spezifischen Widerstands (oben) und der Phase (unten) für eine Messung am künstlichen Probekörper in Abhängigkeit von der Konfiguration (DD links, BD rechts) und der Frequenz. Ein Holzbalken wurde in den Probekörper hineingestellt. Grüner Umriss = Lage des Holzprobekörpers.	49
4.15	Vergleich der Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für eine Messung mit Plastikrohr ($d = 5\text{ cm}$), in Abhängigkeit von der Konfiguration und der Frequenz. Unabhängig davon wird das Rohr in seiner Lage und Größe gut aufgelöst. Die Phasenauswertung hingegen zeigt einen unpolarisierbaren Körper.	50
4.16	Vergleich der Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für eine Messung mit Metallrohr ($d \sim 3,5\text{ cm}$), in Abhängigkeit von der Konfiguration.	51
5.1	Fotos der Probenentnahme für die Anisotropiemessungen. Links: axiale Probenentnahme. Rechts: radiale und tangentiale Probenentnahme. .	54
5.2	Spektren der axialen Eichenkernholzproben. Es zeigt sich eine Abhängigkeit des spezifischen Widerstands, der Phase und der reellen und imaginären Leitfähigkeit vom Entnahmeort. Proben von der Stammachse (Probe A1b, A2) sind in der Tendenz leitfähiger und weniger polarisierbar als Proben in der Nähe des Baumrandes (Probe A8).	55
5.3	Vergleich der richtungsabhängigen Messungen von Eichenkernholzproben. Dabei sind deutliche Unterschiede zwischen den axialen, radialen und tangentialen Proben zu sehen.	56
5.4	Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für drei axiale Eichenkernholzproben.	58
5.5	Porosität (links) und Dichte der axialen Proben aufgetragen gegen die Entfernung von der Stammachse (Mark). Die Porosität nimmt zur Stammachse hin ab und die Dichte zu.	58
5.6	Mittlere Relaxationszeit aufgetragen über den dominanten Poreneingangsdurchmesser für axiale, radiale und tangentiale Eichenkernholzproben.	59
5.7	Spektren des ersten Entsättigungsversuchs. Links sind die spezifischen Widerstände gegen die Frequenz in Abhängigkeit von der Orientierung aufgetragen. Mit abnehmender Sättigung steigt der spezifische Widerstand. In den rechts abgebildeten Phasendarstellungen ist ebenfalls eine Zunahme des Phaseneffektes mit abnehmender Sättigung zu beobachten.	62
5.8	Entsättigungsversuch 1 an Eichenkernholz. Links: Spezifischer Widerstand und Phase für $f = 0,183\text{ Hz}$ aufgetragen über die Sättigung für axiale, radiale und tangentiale Proben. Rechts: Normierte reelle und imaginäre Leitfähigkeiten als Funktion der Sättigung.	63
5.9	Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase (links) sowie der normierten reellen und imaginären Leitfähigkeit (rechts) für den Entsättigungsversuch 2.	64

5.10	Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase (links) sowie der normierten reellen und imaginären Leitfähigkeit (rechts) für Entsättigungsversuch 3.	65
5.11	Abnahme des Darrgewichts (links) und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme (rechts) aufgetragen gegen die Inkubationszeit für die axialen (oben) und radialen (unten) Proben. Während bei den axialen Proben keine Tendenz bei der Abnahme des Darrgewichts über die Zeit erkennbar ist, nimmt sie für die radialen Proben beinahe linear zu. Die Holzfeuchte nimmt in Abhängigkeit von der Inkubationszeit ab.	68
5.12	Spektren ausgewählter Holzproben in Abhängigkeit von der Inkubationszeit für axiale (oben) und radiale Proben. Der spezifische Widerstand nimmt zunächst ab. Später steigt er schnell an. Die Probe trocknet aus. In der Phasendarstellung ist eine deutliche Abnahme mit zunehmender Inkubationszeit zu sehen.	69
5.13	Spezifischer Widerstand, Phase, reelle und imaginäre Leitfähigkeitsanteile aufgetragen über die Inkubationszeit bei der Frequenz des Phasenmaximums ($f = 0,01$ Hz) für die axialen Proben. Ab einer Inkubationszeit von 25 Wochen ist eine Trendumkehr zu beobachten.	71
5.14	Spezifischer Widerstand, Phase, reelle und imaginäre Leitfähigkeitsanteile aufgetragen über die Inkubationszeit bei der Frequenz des Phasenmaximums ($f = 0,183$ Hz) für die radialen Proben. Ähnlich den axialen Proben ist ab einer Inkubationszeit von 22 Wochen eine Trendumkehr für den spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeiten zu beobachten. Die Phase nimmt erneut mit der Inkubationszeit ab.	72
5.15	Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit aufgetragen über die Abnahme des Darrgewichtes für axiale (rot) und radiale (blau) Proben. Die axialen Proben zeigen mit zunehmenden Holzabbau (Änderung des Darrgewichts) eine Verringerung der Phase und des spezifischen Widerstands.	73
5.16	Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit aufgetragen über die Holzfeuchte für axiale und radiale Proben. Die Phase nimmt tendenziell mit steigender Holzfeuchte zu. Der spezifische Widerstand nimmt bis zu einer Holzfeuchte von ca. 50 % stark ab. Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit nehmen für beide Orientierungen unterschiedlich stark zu.	74
5.17	Dreidimensional Darstellung der Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für ausgewählte axiale (links) und radiale Proben. Mit zunehmender Inkubationszeit wird aus der trimodalen eine beinahe unimodale Verteilung.	75
5.18	Dominanter Poreneingangsdurchmesser (links) und zugehöriges differentielles Porenvolumen (rechts) aufgetragen gegen die Inkubationszeit. Beides steigt mit zunehmendem Holzabbau an.	76
5.19	Normierte Aufladbarkeit (links) und mittlere Relaxationszeit aufgetragen über die Inkubationszeit. Deutlich ist mit zunehmender Inkubationszeit ein Abfall der Aufladbarkeit und der mittleren Relaxationszeit zu sehen.	77

5.20	Mikroskopische Aufnahmen der befallenen und unbefallenen Proben. a) radialer Schnitt der axialen, unbefallenen Probe, 20-fache Vergrößerung. b) radialer Schnitt der axialen, befallenen Probe, 20-fache Vergrößerung. c) axialer Schnitt der radialen, unbefallenen Probe, 40-fache Vergrößerung. d) axialer Schnitt der radialen, befallenen Probe, 40-fache Vergrößerung. 1 - Lumen (große Poren), 2 - Holzstrahlen, 3 - Tüpfel (Porenverbindungen).	77
5.21	Versuch mit dem Schwefelporling. Abnahme des Darrgewichts und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Entnahme aufgetragen über die Inkubationszeit für die axialen (oben) und radialen (unten) Proben. Tendenziell ist eine Abnahme des Darrgewichts über die Zeit erkennbar. Die Holzfeuchte nimmt zunächst ab, bis sie sich bei ca. 15% einstellt.	79
5.22	Versuch mit dem Schwefelporling. IP-Spektren ausgewählter Holzproben in Abhängigkeit von der Inkubationszeit für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Nach kurzzeitiger Abnahme steigt der spezifische Widerstand (links) an. Nach Sättigung (gestrichelte Linien) nimmt er wieder ab. In der Phasendarstellung (rechts) ist eine Abnahme mit zunehmender Inkubationszeit zu sehen. Bei Sättigung nimmt die Phase wieder etwas zu, erreicht aber nicht die Größe der unbefallenen Proben. Die radialen Proben der 27. und 30. Woche sind aufgrund der hohen Übergangswiderstände gestört.	80
5.23	Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Inkubationszeit für das jeweilige Phasenmaximum ($f_{max}^{axial} = 0,1 \text{ Hz}$, $f_{max}^{radial} = 0,01 \text{ Hz}$). Die spezifischen Widerstände steigen mit zunehmender Inkubationszeit an. Die Phasen nehmen parallel dazu ab.	81
5.24	Versuch mit dem Schwefelporling. Darstellung des spezifischen Widerstands und der Phase aufgetragen gegen die Abnahme des Darrgewichts für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Mit Abnahme des Darrgewichts steigen die spezifischen Widerstände und sinken die Phasen.	82
5.25	Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen gegen die Holzfeuchte für axiale (oben) und radiale (unten) Proben. Mit zunehmender Holzfeuchte sinken die spezifischen Widerstände und steigen die Phasen.	83
5.26	Vergleich der SIP-Daten von Schwefelporling (SP) und Eichenwirrling (EW). Beide Datensätze zeigen identische Trends.	84
5.27	Vergleich der Ergebnisse des Schwefelporlings (SP) und des Eichenwirrlings (EW) für den spezifischen Widerstand über die Holzfeuchte (links) und die Phase über die Abnahme des Darrgewichts (rechts). Grundsätzlich haben beide Pilze einen ähnlichen Effekt.	84
5.28	Fruchtkörper des Eichenwirrling einer stehenden Eiche. Links: Fruchtkörper an ehemaliger Astungswunde. Rechts: Ober- und Unterseite eines Fruchtkörpers vom Eichenwirrling.	85
5.29	Gesamte Probenentnahme aus einer mit Eichenwirrling befallenen Eiche. Links: Entnahme der gesunden Eichenkernholzproben. Rechts: Entnahme der pilzbefallenen Kernholzproben.	85

5.30	Spektren der mit dem Eichenwirrling befallenen Eichenkernholzproben. Deutliche Unterschiede zwischen gesunden und infizierten Proben sind zu sehen.	86
5.31	Foto der Probenentnahme aus einer mit dem Schwefelporling befallenen Eiche. Nach den Messungen am lebenden Baum (siehe Kap. 6.3) wurden Proben für die Labormessungen entnommen. Pilzbefall ist links durch die Verfärbung erkennbar.	87
5.32	Spezifischer Widerstand, Phase, Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit einer mit Schwefelporling infizierten Eiche. Die unbefallenen Kernholzproben haben niedrige spezifische Widerstände ($\sim 70 \Omega\text{m}$). Diese werden durch den Pilzbefall deutlich verringert. In der Phase sind die pilzbefallenen Kernholzproben eindeutig von den anderen Kernholzproben unterscheidbar.	89
6.1	Tomogramme des spezifischen Widerstands (a), der Phasenverschiebung (b) und des Real- (c) und Imaginärteil (d) der Leitfähigkeit einer gesunden Eiche (Referenzeiche) auf dem BAM Testgelände für die Frequenz 0,156 Hz im Sommer. Deutlich sind konzentrische, ringförmige Strukturen zu erkennen.	95
6.2	Frequenzabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands (links) und der Phasenverschiebung (rechts) der Referenzeiche im Sommer 2008. Während im spezifischen Widerstand nur geringfügige Änderungen erkennbar sind, werden die Tomogramme der Phasenverschiebung bei Frequenzen über 1 Hz deutlich unstrukturierter.	97
6.3	Jahreszeitenabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands (links) und der Phasenverschiebung (rechts) der Referenzeiche (Dipol-Dipol-Konfiguration). Im Winter (untere Tomogramme) sind infolge des eingestellten Wassertransportes und des Temperatureffektes die spezifischen Widerstände wesentlich höher.	98
6.4	Lineare Darstellung der jahreszeitlichen Unterschiede einer gesunden Eiche in Abhängigkeit vom Abstand zur Baummitte.	99
6.5	Frequenzabhängige Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phasenverschiebung für eine gesunde, 60-jährige Eiche im Sommer 2008. Achtung: für $f = 125 \text{ Hz}$ und für $f = 1000 \text{ Hz}$ ändert sich die Farbskala der Phase.	101
6.6	Tomogramme des spezifische Widerstands und der Phasenverschiebung von Eichen verschiedenen Alters bei unterschiedlichen Frequenzen. Da die 350-jährige Eiche sehr niedrige spezifische Widerstände aufweist (m, o, q), musste eine eigene Farbskala angewendet werden!	103
6.7	Foto des Messaufbaus an einer Eiche (Nr. 1) mit Anfahrsschaden. Die Messungen fanden in zwei Ebenen statt.	104
6.8	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Foto (links) und Tomogramme des spezifischen Widerstands (mittig) und der Phase (rechts) für beide Messebenen ($f = 0,312 \text{ Hz}$). Der befallene Bereich stellt sich als niederohmige Anomalie im spezifischen Widerstand dar.	105

6.9	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Vergleich der Tomographieergebnisse von Messebene 2 für $f = 0,312 \text{ Hz}$. Links die Messung am stehenden Baum (vgl. Abb. 6.8), rechts am selben Stammstück nach 4-wöchiger Trocknung an der Luft. Der am stärksten befallene Bereich zeichnet sich durch hohe spezifische Widerstände und niedrige Phasen aus.	106
6.10	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Foto von Messebene 2 mit Kennzeichnung der entnommen Probensegmente für die Labormessungen. Die durch den Pilz verursachte Kernholzverfärbung ist deutlich erkennbar.	107
6.11	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Vergleich zwischen den im Labor gemessenen Werten mit den Werten aus der Tomographiemessung, 4 Wochen nach der Fällung für $f = 0,312 \text{ Hz}$. Links: Proben R1 bis R6, rechts: Proben R7 bis R12.	108
6.12	Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Fotos des Messaufbaus. In beiden Messebenen wurden SIP- (linkes Bild) und Schallmessungen (rechtes Bild) durchgeführt.	109
6.13	Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für $f = 0,312 \text{ Hz}$ sowie von der Schallmessung für Messebene 1. Im Vergleich dazu das unmittelbar nach der Fällung aufgenommene Foto.	110
6.14	Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Tomogramme des spezifischen Widerstands und der Phase für $f = 0,312 \text{ Hz}$ sowie von der Schallmessung für Messebene 2. Im Vergleich dazu das unmittelbar nach der Fällung aufgenommene Foto.	111
6.15	Eiche Nr. 2 - Pilzbefall: Probenentnahme und Holzfeuchte aus Messebene 2. Die grundsätzlich sehr hohe Holzfeuchte verringert sich zum inneren Kernholz hin.	112
6.16	Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Fotos des Messaufbaus. Die Messungen fanden in drei Ebenen mit dem SIP-Verfahren und dem Bohrwiderstandsverfahren statt.	113
6.17	Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Spezifischer Widerstand (a, c, e) und Phasentomogramme (b, d, f) für die drei Messebenen bei $f = 0,156 \text{ Hz}$	114
6.18	Eiche Nr. 3 - Pilzbefall: Foto der Messebene 2 (a), Bohrwiderstandsdaten (b) sowie die Daten des spezifischen Widerstands(c) und der Phasenverschiebung (d) zum Vergleich.	115
A.1	Ergebnisse der Widerstands- und Phasenmessung am Testnetzwerk mit der SIP 256C für verschiedene Frequenzen. Die Widerstandsdaten sind frequenzunabhängig. In der Phase zeigt sich eine Zunahme der Phase mit steigender Frequenz. Der vom Gerät ausgegebene Messfehler für $f = 10 \text{ Hz}$ ist mitdargestellt. Für alle anderen Frequenzen ist er ähnlich groß.	125
A.2	Tomogramme des spezifischen Widerstands für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle bei einer Messung mit Holzbalken im wassergefüllten, zylindrischen Probekörper. Dabei markieren die grünen Vierecke die Position des Holzbalkens. Die gestrichelten, gelben Linien zeigen die Stromelektroden an.	126

A.3	Vergleich von K -Faktor korrigierten und unkorrigierten Widerstandstomogrammen für eine Messung mit Holzbalken (links) und Plastikrohr (rechts) für die Dipol-Dipol-(DD) und Bipol-Dipol-(BD) Auslage ($f = 1,25$ Hz). Im Fall des Holzbalkens enthielt der Probekörper Leitungswasser, im Fall des Plastikrohrs Salzwasser. Eine leichte Verbesserung der Auflösung durch die Korrektur ist erkennbar. Die grünen Umrisse geben die reale Lage des Holzbalkens bzw. des Rohres wieder.	126
A.4	Vergleich der Auflösung zweier unterschiedlicher Plastikrohre ($d_1 = 4$ cm (links), $d_2 = 10$ cm (rechts)). Die Rohre waren zentral und seitlich angeordnet. $f = 1,25$ Hz, Dipol-Dipol-Auslage.	127
B.1	Spezifischer Widerstand und Phase für eine Mehrfachmessung. Die Probe verändert sich in der Messzelle mit der Zeit. Die Standardabweichung für den spezifischen Widerstand beträgt dabei 4,5 %. Für die Phasenverschiebung ist sie mit 3 % geringer. Der Fehler der Phasenverschiebung nimmt mit geringer werdender Frequenz zu.	129
B.2	Vergleich der Spektren von axialen Eichenkernholzproben zu unterschiedlichen Messzeitpunkten. Zwischen den Wiederholungsmessungen lagerten die Proben zwei Jahre vollgesättigt in destilliertem Wasser.	129
B.3	Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen axialen Proben. Proben A3, A5 und A8 wurden mit einem anderen Quecksilberporositätsmessgerät gemessen als die restlichen Proben.	130
B.4	Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen radialen Proben.	131
B.5	Verteilung der Poreneingangsdurchmesser für alle im Anisotropieversuch (Kap. 5.1) gemessenen tangentialen Proben.	132
B.6	Poreneingangsdurchmesser für alle in Kapitel 5.3.1 untersuchten axialen Eichenwirrlingsproben. Oben ist die unbefallenen Probe zu sehen; darauf folgend die Proben mit zunehmender Inkubationszeit.	133
B.7	Poreneingangsdurchmesser für alle in Kapitel 5.3.1 untersuchten radialen Eichenwirrlingsproben. Oben ist die unbefallenen Probe zu sehen; darauf folgend die Proben mit zunehmender Inkubationszeit.	134
B.8	Gesamtresultate der mit der Quecksilberporosimetrie untersuchten axialen Eichenwirrlingsproben aus Versuch 5.3.1.	135
B.9	Gesamtresultate der mit der Quecksilberporosimetrie untersuchten radialen Eichenwirrlingsproben aus Versuch 5.3.1.	136
B.10	Porosität aufgetragen gegen die Inkubationszeit. Tendenziell steigt die Porosität mit zunehmender Inkubationszeit an.	137
B.11	Mittlere Relaxationszeit und Ungleichförmigkeit aufgetragen über den dominanten Poreneingangsdurchmesser. Die mittleren Relaxationszeiten und die Ungleichförmigkeit nehmen mit größer werdendem, dominantem Poreneingangsdurchmesser ab. Das ist für die radialen Proben deutlicher zu sehen als für die axialen Proben.	137

B.12	Mikroskopische Aufnahmen der axialen Proben. Die Schnitte sind radial angesetzt. Bild a) unbefallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild b) unbefallene Probe in 40 - facher Auflösung. Bild c) befallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild d) befallene Probe in 40 - facher Auflösung.	138
B.13	Mikroskopische Aufnahmen der radialen Proben. Die Schnitte sind axial angesetzt. Bild a) unbefallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild b) unbefallene Probe in 40 - facher Auflösung. Bild c) befallene Probe in 20 - facher Auflösung. Bild d) befallene Probe in 40 - facher Auflösung.	138
B.14	Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Zeit für das jeweilige Phasenmaximum ($f_{max}^{axial} = 0,1 \text{ Hz}$, $f_{max}^{radial} = 0,01 \text{ Hz}$). Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung.	139
B.15	Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Abnahme des Darrgewichts. Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung.	140
B.16	Versuch mit dem Schwefelporling. Spezifischer Widerstand und Phase aufgetragen über die Holzfeuchte. Unterscheidung zwischen Proben ohne zusätzliche Sättigung (original) und mit nachträglicher Sättigung. . . .	141
C.1	Schalltomogramm der Referenzeiche. Braun steht für gesundes, festes Holz. Blau-Violett für stark zerstörtes Holz. Das Schalltomogramm zeigt einen im Inneren gesunden Baum.	143
C.2	Bohrwiderstandsmessungen an der Referenzeiche. Der Bohrkanal befindet sich bei den SIP-Messelektroden 1 (oben) und 17. Der mechanische Bohrwiderstand nimmt in Richtung Bauminneres zu. Der Baum ist an den gebohrten Stellen gesund.	143
C.3	Vergleich zwischen den spezifischen Widerstandsmessungen an der Referenzeiche (August 2007). Links: Messhardware Treetronic der Fa. argus electronic (Lothar Göcke), invertiert mit DC2dTree. Rechts: Messhardware SIP 256C, invertiert mit DC2dTree ($f = 0,156 \text{ Hz}$). Zwischen beiden Tomogrammen bestehen nur sehr geringe Unterschiede.	144
C.4	Vergleich der Inversionsergebnisse für den spezifischen Widerstand und die Phase für den Datensatz der Referenzeiche im Juni 2007. Oben: Inversionssoftware der Uni Bonn. Unten: DC2dTree - Inversion. Grundsätzlich sind ähnliche Strukturen zu sehen.	145
C.5	Tomogramme des spezifischen Widerstands für sämtliche Jahreszeitenmessungen der Referenzeiche ($f = 0,156 \text{ Hz}$). Die Messungen fanden zwischen August 2005 und April 2009 statt.	146
C.6	Tomogramme der Phasenverschiebung für sämtliche Jahreszeitenmessungen der Referenzeiche ($f = 0,156 \text{ Hz}$). Die Messungen fanden zwischen August 2005 und April 2009 statt.	147
C.7	Tomogramme des Real- (links) und Imaginärteil (rechts) der Leitfähigkeit zu unterschiedlichen Jahreszeiten für $f = 0,156 \text{ Hz}$. Der Einfluss der Jahreszeit wirkt sich auch auf die Leitfähigkeitsanteile aus.	148

C.8	Schalltomogramm der 350-jährigen Eiche. Braun steht für gesundes, festes Holz. Blau-Violett für stark zerstörtes Holz. Im Inneren dieser Eiche ist eine Zone mit geringerer Holzfestigkeit zu sehen.	149
-----	--	-----

Tabellenverzeichnis

4.1	Durchschnittliche Abweichung der Stahl- und Goldelektroden von 0° für ausgewählte Stromdipole und für die gesamten Stromdipole einer Messung.	35
4.2	Bipol-Dipol-Konfiguration unter verschiedenen Winkeln mit Angabe des jeweiligen Stromelektrodenpaars. Die Stromelektroden bei den ersten vier Anordnungen stehen sich 180° gegenüber (1-13, 4-16, ...), bei den letzten vier 90° zueinander (1-7, 7-13, ...)	41
4.3	Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der Probekörper war mit Leitungswasser gefüllt, welches einen spezifischen Widerstand von $13,6 \Omega\text{m}$ aufwies. . .	41
4.4	Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der wassergefüllte Probekörper war zusätzlich mit einem Holzbalken bestückt. Der Anpassungsfehler (RRMS) der invertierten Daten ist aufgrund der geringen Messqualität erhöht. .	41
4.5	Abweichung der invertierten Daten für die verschiedenen Bipol-Dipol-Fälle im Vergleich zum Fall 1. Der wassergefüllte Probekörper war zusätzlich mit einem Metallrohr bestückt. Der Anpassungsfehler (RRMS) der invertierten Daten ist mit durchschnittlich 2,8% gut.	41
4.6	Vergleich der Anordnungen, Messdauer und Datenanzahl für vier verschiedene Konfigurationen bei einer Messfrequenz von 1,25 Hz (Multikanalapparat).	42
4.7	Tabelle mit den verschiedenen Wasserstandshöhen über der Messebene, den dazugehörigen spezifischen Widerständen des Wassers und dem Verhältnis von Wasserstandshöhe L zum Radius r des Probekörpers. . .	46
5.1	Berechnete Anisotropiekoeffizienten für den spezifischen Widerstand bei der Frequenz $f = 0,156 \text{ Hz}$	57
5.2	Porositäten alle Proben des Anisotropieversuchs.	59
5.3	Anstiege der reellen (n) und imaginären (ν) Leitfähigkeiten für die Entsättigungsmessungen.	61
5.4	Durchschnittliche Phasenwerte $[\circ]$ der mit Schwefelporling befallenen, lebenden Eiche für verschiedene Frequenzen.	88
5.5	Durchschnittliche imaginäre Leitfähigkeiten [10^{-3} S/m] der mit Schwefelporling befallenen, lebenden Eiche für verschiedene Frequenzen. . . .	88
6.1	Eiche Nr. 1 - Pilzbefall: Labormesswerte aus Messebene 2 für $f = 0,312 \text{ Hz}$. Bei den kursiv dargestellten Proben war eine durch Pilzbefall verursachte Verfärbung sichtbar.	107

Literaturverzeichnis

- Archie, G.E. (1942) "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Trans. Am. Inst. Min.*, 146, 54–62.
- Baumkontrollrichtlinie (2004) "Richtlinie zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen", Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. FLL.
- Bieker, D.; Krummheuer, F.; Rust, St. und Weihs, U. (2007) "Neue Anwendungsgebiete der elektrischen Widerstandstomographie", in: *Tagungsband der Osnabrücker Baumpflege 2007*.
- Binley, A.; Slater, L.D.; Fukes, M. und Cassiani, G. (2005) "Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone", *Water Resources Research*, 41, W12417.
- Börner, F.D.; Schopper, J.R. und Weller, A. (1996) "Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements", *Geophysical Prospecting*, 44, 583 – 601.
- Bosshard, H.H. (1974) *Holzkunde 2: Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*, Birkhäuser Verlag.
- Brandt, M. und Rinn, F. (1989) "Eine Übersicht über Verfahren zur Stammfäuleдиаgnose", *Holz-Zentralblatt*, 80, 1268 – 1270.
- Breede, K. (2006) *SIP-Messungen an Sandsteinen*, Diplomarbeit, Technische Universität Clausthal.
- Brown, J.H.; Davidson, R.W. und Skaar, Ch. (1963) "Mechanism of Electrical Conduction in Wood", *FPJ - Forest Product Journal*, 13 (10), 455 – 459.
- Bucher, H.P.; Kucera, L.J.; Walter, M. und Bosen, K.J.M. (1993) "Elektrische Leitwertprofile im Holzkörper mitteleuropäischer Baumarten, bestimmt mit dem Vitamat", *Mitteilungen der Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft*, 68 (2), 63 – 144.
- Bucur, V. (2004) "Techniques for High Resolution Imaging of Wood Structures", in: *World Conference of Nondestructive Testing*, 1 – 8, Montreal.
- Bucur, V.; Lanceleur, P. und Roge, B. (2002) "Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces", *Ultrasonics*, 40, 537 – 541.
- Burmester, A. (1978) "Jahreszeitliche Änderung physikalischer Holzeigenschaften in einem Eichenbaum (*Quercus robur* L.)", *Holz als Roh- und Werkstoff*, 36, 315–321.

- Chambers, J.E.; Loke, M.H.; Ogilvy, R.D. und Meldrum, P.I. (2004) “Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography”, *Journal of Contaminated Hydrology*, 68, 1–22.
- Clark, J.D. und Williams, J.W. (1933) “The electrical conductivity of commercial dielectrics and its variation with temperature”, *Journal of physical chemistry*, 37, 119 – 131.
- Dahlin, T. und Zhou, B. (2004) “A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays”, *Geophysical Prospecting*, 52, 379–398.
- Dinwoodie, J.M. (2000) *Timber: Its nature and behaviour*, 2.Auflage, E and FN Spon, 272 Seiten.
- Du, Q. (1991) *Einfluss holzartsspezifischer Eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit wichtiger Handelshölzer*, Dissertation, Universität Hamburg, 211 Seiten.
- Dubbel, V.; Weihs, U.; Krummheuer, F. und Just, A. (1999) “Neue Methode zur zweidimensionalen Darstellung von Fäulen an Fichte”, *AFZ - Der Wald*, 26, 1422 – 1424.
- Dujesiefken, D. und Liese, W. (1990) “Einfluß der Verletzungszeit auf die Wundheilung bei Buche (*Fagus sylvatica* L.)”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 48, 95–99.
- Dujesiefken, D.; Peylo, A. und Liese, W. (1991) “Einfluß der Verletzungszeit auf die Wundreaktionen verschiedener Laubbäume und der Fichte”, *Forstw. Cbl.*, 110, 371 – 380.
- Eckstein, D. und Saß, U. (1994) “Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52, 279–286.
- Edwards, L.S. (1977) “A modified pseudosection for resistivity and IP”, *Geophysics*, 42 (5), 1020–1036.
- argus electronic (2005) *Handbuch zu Picus Calliper*, argus electronic, www.argus-electronic.de.
- (2008a) *Electrical Impedance Tomography for trees*, argus electronic, www.argus-electronic.de.
- (2008b) *Handbuch zum Picus Schalltomographen*, argus electronic, www.argus-electronic.de.
- Fengel, D. und Wegener, G. (1984) *Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Gilbert, E.A. und Smiley, E.Th. (2004) “Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp)”, *Journal of Arboriculture*, 30 (5), 277 – 281.
- Görlacher, R. und Hättich, R. (1992) “Die Bohrwiderstandsmessung”, *Holzbau-Statik-Aktuell*, 2, 10 – 14.

- Grosser, D. (1977) *Die Hölzer Mitteleuropas*, Springer-Verlag, 217 Seiten.
- Gruber, F. (2001) "Vergleich der Diagnosegeräte Teredo, Resistograph und Impulshammer-Schallmesssystem", *AFZ - Der Wald*, 6, 280 – 283.
- Günther, Th. und Rücker, C. (2005) "DC2DTree, www.resistivity.net", .
- Günther, Th.; Rücker, C. und Spitzer, K. (2006) "Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion", *Geophysical Journal International*, 166 (2), 506 – 517.
- Haaben, Ch.; Sander, C. und Hapla, F. (2006) "Untersuchung der Stammqualität verschiedener Laubholzarten mittels Schallimpuls-Tomographie", *Holztechnologie*, 47, 5 – 12.
- Habermehl, A. und Ridder, H.-W. (1996) "Computer-Tomographie in der Forstwirtschaft und Baumpflege (Teil 1)", *DGZfP-Zeitung* 55, 48 – 55.
- al Hagrey, S.A. (2006) "Electrical resistivity imaging of tree trunks", *Near Surface Geophysics*, 179 – 187.
- (2007) "Geophysical imaging of root-zone, trunk and moisture heterogeneity", *Journal of Experimental Botany*, 58, 839 – 854.
- Hanskötter, B. (2003) *Diagnose fakultativer Farbkerne an stehender Rotbuche (Fagus sylvatica L.) mittels elektrischer Widerstandstomographie*, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Cuvillier Verlag Göttingen, 133 Seiten.
- Hasenstab, A. (2005) *Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 108ff Seiten.
- Holdenrieder, O. (1994) "Angriff und Abwehr im Baum: Die Entstehung von Kernfäule", *Schweiz. Z. Fortswes.*, 145 (11), 887 – 903.
- IML (2005) *Gebrauchsanweisung IML-Resi, Baureihe E*, www.iml.de.
- Jaskula, P. und Blatt, A. (2001) "Vergleich der Wundreaktion an Bohrlöchern vom Resistographen, Teredo-Prüfnadelmesssystem und Zuwachsbohrer", *Jahrbuch der Baumpflege* 2001.
- Just, A. (2002) *Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes an zylinderförmigen Körpern mit Hilfe der Elektrischen Widerstandstomographie*, Dissertation, Universität Leipzig.
- Just, A.; Hahn, G.; Dudykevych, T.; Hellige, G.; Hoffmann, N. und Weihs, U. (2005) "Elektrische Impedanztomographie für zylindrische Objekte - Anwendung in der Medizin und an Bäumen", 65. Jahrestagung der DGG, Graz.
- Kemna, A. (2000) *Tomographic Invesion of Complex Resistivity*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

- Kemna, A.; Binley, A. und Slater, L. (2004) “Corsshole IP imaging for engineering and environmental applications”, *Geophysics*, 69 (1), 97 – 107.
- Kempe, K. (1999) *Dokumentation Holzschädlinge: Holzerstörende Pilze und Insekten an Bauholz*, Verlag Bauwesen.
- Kersten, W. (2001) “Infektionsgefahr durch den Einsatz invasiver Diagnosegeräte am lebenden Baum”, *Jahrbuch der Baumpflege* 2001.
- Klobes, P.; Meyer, K. und Munro, R.G. (2006) “Porosity and Specific Surface Area Measurements for Solid Materials”, Special Publication 960-17, NIST practice guide.
- Knödel, K.; Krummel, H. und Lange, G. (2005) *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien - Geophysik*, Band 3, Springer Verlag.
- Kollmann, F. (1936) *Technologie des Holzes*, Band 1, Verlag von Julius Springer.
- (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Band 2, Springer Verlag.
- Kretschmar, D. (2001) *Untersuchung zur Inversion von spektralen IP-Daten unter Berücksichtigung elektromagnetischer Kabelkopplungseffekte*, Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Kruschwitz, S.F. (2007) *Assesment of the complex resistivity behavior of salt affected building materials*, Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Kucera, L.J. und Niemz, P. (1986) “Kernspintomographie und der Wasserhaushalt erkrankter Bäume”, *Forstarchiv*, 57 (3), 83–87.
- (1998) “Fäule in Bäumen erkennen”, *Wald und Holz*, 2, 27 – 30.
- LaBrecque, D. und Daily, W. (2008) “Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition”, *Geophysics*, 73 (2).
- LaBrecque, D.; Daily, W. und Adkins, P. (2007) “Systematic Errors in Resisitivity Measurement Systems”, in: *SAGEEP Proceedings*, 1153 – 1160.
- Lesmes, D.P. und Frye, K.M. (2001) “Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone”, *Journal of Geophysical Research*, 106 (B3), 4079–4090.
- Lippmann, E. (2008) “Lippmann 4-Punkt-Light”, www.l-gm.de.
- Mattheck, C. und Hötzel, H.-J. (1999) *Baumkontrolle mit VTA*, Rombach Verlag, Freiburg.
- Nicolotti, G.; Socco, L.V.; Martinis, R.; Godio, A. und L.Sambuelli (2003) “Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees”, *Journal of Aboriculture* 29, 66–78.
- Niemz, P. (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH Co.

- (1996) “Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Schallausbreitung in Roble”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54, 60.
- Niemz, P.; Bodmer, H.-C.; Kucera, L.J.; Ridder, H.-W.; Habermehl, A.; Wyss, P.; Zürcher, E. und Holdenrieder, O. (1998) “Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäule bei Fichte”, *Schweiz. Z. Forstwes.*, 149 (8), 615–530.
- Niemz, P.; Bues, C.-Th. und Herrmann, St. (2002) “Die Eignung von Schallgeschwindigkeiten und Bohrwiderstand zur Beurteilung von simulierten Defekten im Fichtenholz”, *Schweiz. Z. Forstwes.*, 153 (6), 201–209.
- Niemz, P.; Kucera, L. J.; Schob, M. und Scheffler, M. (1999a) “Experimentelle Untersuchungen zur Erkennung von Defekten in Holz mittels Ultraschall”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57, 96 – 102.
- Niemz, P.; Kucera, L.J. und Bernatowicz, G. (1999b) “Untersuchungen zum Einfluß des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57, 225.
- Nordsiek, S. und Weller, A. (2008) “Decomposition of IP Spectra into Debye Models”, *Geophysics*, 73 (6), 235–245.
- Nusser, E. (1936) *Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit durch Messung des elektrischen Widerstandes*, Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart.
- Olhoeft, G.R: (1985) “Low-frequency electrical properties”, *Geophysics*, 50 (12), 2492 – 2503.
- Pelton, W.H.; Ward, S.H.; Hallof, P.G.; Sill, W.R. und Nelson, P.H. (1978) “Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP”, *Geophysics*, 43, 588 – 609.
- Piirto, D.D. und Wilcox, W.W. (1978) “Critical Evaluation of the Pulsed-Current Resistance Meter for Detection of Decay in Wood”, *FPJ - Forest Product Journal*, 28 (1), 52 – 57.
- Radic, T. (2004a) *Bedienungsanleitung SIP256C*, Radic-Research, www.radic-research.de.
- (2004b) “Elimination of cable effects while multi-channel SIP measurements”, in: *Near Surface 2004 - 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Utrecht, Niederlande.
- (2008a) “Geräteblatt Labor SIP Apparaturen”, <http://www.radic-research.homepage.t-online.de/Flyerf>.
- (2008b) *Instrumentelle und auswertemethodische Arbeiten zur Wechselstromgeoelektrik*, Dissertation, Technische Universität Berlin.

- Rinn, F.; Schweingruber, F.-H. und Schär, E. (1996) "RESISTROGRAPH and X-Ray Density of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species", *Holzforschung*, 50, 303 – 311.
- Rust, S.; Franz, S.; Minke, M.; Schumann, I. und Roloff, A. (2002) "Schalltomographie zur Erkennung von Fäule und Höhlungen an stehenden Bäumen", *Stadt + Grün*, 50 – 52.
- Rust, S. und Weihs, U. (2007) "Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung", *Jahrbuch der Baumpflege 2007*, 215 – 229.
- Schleifer, N. (2002) *Anwendung der spektralen Induzierten Polarisation in der archäologischen Prospektion*, Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main.
- Schleifer, N. und Junge, A. (2004) "Comparison of different electrodes for frequency domain Induced Polarisation (IP) surveys", in: *Near Surface 2004 - 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Utrecht, Niederlanden.
- Schleifer, N.; Weller, A.; Schneider, S. und Junge, A. (2002) "Investigation of a Bronze Age Plankway by Spectral Induced Polarization", 9, 243–253.
- Schmidt, O. (2006) *Wood and Tree Fungi*, Springer Verlag.
- Schön, J. (2004) *Physical Properties of Rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics*, Band 18, Elsevier.
- Schwarze, F. (1994) *Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzersetzen-den Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro*, Dissertation, Albert-Ludwig-Universität Freiburg, 163 Seiten.
- Schwarze, F.; Rabe, Ch.; Ferner, D. und Fink, S. (2004) "Schalltomografische Untersuchungen an pilzinfizierten Bäumen", *AFZ - Der Wald*, 2, 55 – 60.
- Schwarze, F.W.M.R.; Engels, J. und Mattheck, C. (1999) *Holzersetzende Pilze in Bäumen*, Rombach Verlag, 245 Seiten.
- Schweingruber, F.H. (1990) *Anatomie europäischer Hölzer*, Haupt.
- Shigo, A.L. und Shigo, A. (1974) *Detection of Discoloration and Decay in Living Trees and Utility Poles*, Technischer Bericht.
- Skaar, C. (1964) "Some Factors Involved in the Electrical Determination of Moisture Gradients in Wood", *FPJ - Forest Products Journal*, 14 (6), 239 – 243.
- Stamm, A.J. (1930) "An Electrical Conductivity Method for Determining the Moisture Content of Wood", *Industrial and engineering chemistry*, 19 (9), 1021 – 1025.
- Tiitta, M.; Kainulainen, P.; Harju, A.M.; Venäläinen, M.; Manninen, A.-M.; Vuorinen, M. und Viitanen, H. (2003) "Comparing the Effect of Chemical and Physical Properties on Complex Electrical Impedance of Scots Pine Wood", *Holzforschung*, 57, 433 – 439.

- Tomiczek, Ch. (1996) "Methodenvergleich zur Abschätzung der Rotfäule an Fichten", *Österreichische Forstzeitung*, 7, 45 – 46.
- Trendelenburg, R. (1939) *Das Holz als Rohstoff*, J.F. Lehmanns Verlag, München/Berlin.
- Trendelenburg, R. und Mayer-Wegelin, H. (1955) *Das Holz als Rohstoff*, Band 2, Carl-Hanser-Verlag, München.
- Ulrich, C. und Slater, L.D. (2004) "Induced polarization measurements on saturated, unconsolidated sands", *Geophysics*, 69 (3), 762–771.
- Wagenführ, R. (1999) *Anatomie des Holzes*, DRW-Verlag, 190 Seiten.
- Wang, X.; Ross, R.J.; McClellan, M.; Barbour, R.J.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W. und McGinnis, G.D. (2000) "Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique", *Research Paper 585*.
- Weidelt, P. und Weller, A. (1997) "Computation of geoelectrical configuration factors for cylindrical core samples", *Scientific Drilling*, 6, 27 – 34.
- Weihs, U.; Dubbel, V.; Krummheuer, F. und Just, A. (1999) "Die elektrische Widerstandstomographie", *Forst und Holz*, 54, 166 – 170.
- Weller, A. und Börner, F. D. (1996) "Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes", *Environmental Geology*, 27, 329–334.
- Wenzel, J.-M. (1999) "Bohrwiderstandsverfahren zur Unterstützung der Baumdiagnose", *Neue Landschaft*, 1, 37 – 43.
- Zürcher, E. (1988) "Diagnosemethode des Gesundheits- und Vitalitätszustandes der Bäume", *Vierteljahresschrift der Naturforsch. Gesellsch. in Zürich*, 133 (1), 25 – 42.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. A. Weller (TU Clausthal) bedanken, der diese Arbeit über die Jahre hinweg interessiert verfolgt und betreut hat. Die Diskussionen mit ihm sowie seine Kommentare und Anregungen waren sehr hilfreich und wertvoll. Herrn Prof. Dr. A. Kemna (Uni Bonn) danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und der kurzfristigen Modifikation seines Inversionsprogramms CR-Tomo für die Anwendung auf Baumdaten. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. N. Meyer (TU Clausthal).

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Doktorandenprogramms der BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Daher geht ein großer Teil des Dankes an die gesamte BAM-Fachgruppe VIII.2 - Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren. Neben meinem Abteilungsleiter Dr. H. Heidt und meinem Fachgruppenleiter Dr. H. Wiggenhauser möchte ich mich vor allem bei meinem Arbeitsgruppenleiter E. Niederleithinger und meiner Kollegin Dr. S. Kruschwitz bedanken für ihre Unterstützung und die Bereitschaft, mit mir jederzeit über SIP- (und andere) Probleme zu diskutieren.

Danken möchte ich auch meinen KollegInnen und PraktikantInnen, die mich unterstützten, Tipps gaben und mir bei meinen Messungen halfen. Vor allem bei S. Smith, der am öftesten von allen bei den meist winterlichen Messeinsätzen frieren musste.

Auch andere Fachgruppen der BAM haben ihren Teil zu dieser Arbeit beigetragen. In erster Linie Fachgruppe IV.1 - Biologie im Umwelt und Materialschutz, insbesondere K. Klutzny und Dr. I. Stephan haben mir mit ihrem Umgang und Wissen über Holz und Pilze sehr weitergeholfen. Ein weiterer Dank geht auch an Fachgruppe I.3 - Strukturanalytik; Polymeranalytik für ihre Bereitschaft auch an Holz die Methode der Quecksilberporosimetrie durchzuführen.

Neben der BAM erhielt ich auch von vielen weiteren Menschen Hilfe und Unterstützung. Eine sehr große Hilfe war Dr. Th. Günther vom LIAG Hannover, ohne den die Auswertung sämtlicher Feldmessungen zu dem Zeitpunkt dieser Arbeit noch gar nicht möglich gewesen wäre.

Ebenso will ich mich bei den Herstellern von zwei der verwendeten Apparaturen bedanken. Zum einen bei Dr. T. Radic der Fa. Radic Research für seine zahlreichen Umbauten an unserem SIP256C-Gerät und den ausführlichen Lösungsvorschlägen zu vielen Anwendungsproblemen. Sowie bei L. Göcke der Fa. argus electronic für seine kompetente Hilfe in allen Fragen der Schalltomographie.

Dem Natur- und Grünflächenamt Steglitz-Zehlendorf, insbesondere J. Körner, danke ich dafür, dass ich die ganzen Jahre hindurch mit Eichen und anderen Bäumen versorgt wurde. Ebenso danke ich unserem Bundesförster Hr. Mauve vom Testgelände Technische Sicherheit Horstwalde für seine unkomplizierte und schnelle Hilfe.

Ein weiterer Dank geht nach Hamburg an Dr. D. Dujesiefken vom Institut für Baumpflege für seine anfängliche Hilfe in baumtechnischen Belangen. Bedanken möchte ich mich zudem auch bei S. Nordsiek für seine Hilfe und dem Institut für Geophysik der TU Clausthal, wo ich mich trotz der seltenen Besuchen immer willkommen fühlte.

Letztendlich geht noch ein großer Dank an die, die den meisten Stress mit dieser Arbeit hatten. Bei mir waren das meine Kinder Mia, Meo und Miki, die viel Zeit in der Kita und in der Schule/Hort verbringen durften und mein Mann Carsten Martin, ohne dessen permanente Unterstützung und ständige Rücksichtnahme dieses Arbeit vermutlich nie geschrieben worden wäre.

Vielen Dank!